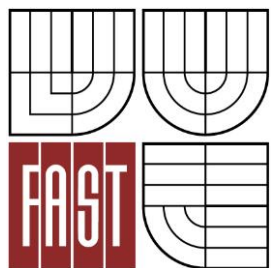




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

# HODNOCENÍ METOD PRO STANOVENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

EVALUATION OF METHODS FOR DETERMINING AN AIR HUMIDITY IN BUILDING  
CONSTRUCTIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. TEREZA NOGOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ŽÁK, Ph.D.

BRNO 2015



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program** N3607 Stavební inženýrství  
**Typ studijního programu** Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia  
**Studijní obor** 3608T001 Pozemní stavby  
**Pracoviště** Ústav pozemního stavitelství

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**Diplomant** Bc. Tereza Nogová  
**Název** Hodnocení metod pro stanovení vlhkosti ve stavebních konstrukcích  
**Vedoucí diplomové práce** Ing. Antonín Žák, Ph.D.  
**Datum zadání diplomové práce** 31. 3. 2014  
**Datum odevzdání diplomové práce** 16. 1. 2015

V Brně dne 31. 3. 2014

prof. Ing. Milošlav Novotný, CSc.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

### **Podklady a literatura**

Rešerše současného poznání, katalogy a odborná literatura, platné ČSN, směrnice děkana č. 19/2011 a dodatky

Manuály k použitému softwaru.

### **Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)**

Zadání VŠKP:

Hodnocení metod pro stanovení vlhkosti ve stavebních konstrukcích.

Cíl práce:

Rešerše současného stavu poznání problematiky.

Porovnání experimentálních a teoretických metod pro stanovení vzdušné a zkondenzované vlhkosti v konstrukci.

Vývoj metody pro ověření kondenzace vzdušné vlhkosti v konstrukcích.

Validace počítačových simulací experimentem na zjednodušeném modelu.

Požadované výstupy:

Práce bude tvořena hlavní textovou částí a přílohami. Součástí přílohy budou výsledky experimentu a fotodokumentace.

Práce bude předložena v knižní podobě v deskách z tvrdého papíru potažených černým plátnem s předepsaným popisem se zlatým (stříbrným) písmem.

VŠKP bude obsahovat kromě ostatních položek také položku h) Úvod (popis námětu na zadání VŠKP), položku i) Vlastní text práce a položku j) Závěr (zhodnocení obsahu VŠKP, soulad se zadáním, změny oproti původní studii).

Osnova práce bude zpracována dle směrnice děkana č. 19/2011 a dodatky.

### **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Antonín Žák, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce



## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce porovnává metody pro stanovení vzdušné a zkondenzované vlhkosti v konstrukci. Jsou zde uvedeny popisy a vzorce jednotlivých metod pro měření vzdušné vlhkosti a metody pro výpočet kondenzace ve stavebních konstrukcích.

Praktická část práce popisuje vývoj metody pro ověření kondenzace vlhkosti v konstrukcích. Součástí práce jsou použité materiály a metody pro vývoj vlhkostního senzoru. Pro měření kondenzace vlhkosti byly použity dvě metody – kapacitní a odporová. V závěru je uvedeno hodnocení vlhkostního senzoru a jsou porovnány výsledky z jednotlivých měření.

### **Klíčová slova**

Vlhkost ve stavebních konstrukcích, kondenzace, voda, sádra, odporový princip měření vlhkosti, kapacitní princip měření vlhkosti, vlhkostní senzor.

## **ABSTRACT**

This thesis compares the methods for the determination of air and moisture condensation in the construction. There are descriptions of the various methods and formulas for measuring humidity and methods for the calculation of condensation in building structures.

The practical part describes the development of a method for verifying the condensation of moisture in construction. Parts of this work are the materials and methods for the development of the humidity sensor. There were used two methods – capacitive and resistive for measuring moisture condensation. In the conclusion is the evaluation of the humidity sensor and compares the results of individual measurements.

### **Key words**

Moisture in building construction, condensation, water, gypsum, resistive humidity measurement, capacitive principle humidity measurement, humidity sensor.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOGOVÁ, Tereza. *Hodnocení metod pro stanovení vlhkosti ve stavebních konstrukcích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015. 95 s., 38 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí diplomové práce Ing. Antonín Žák, Ph.D.

---

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI VŠKP

### PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 1. 2015

.....

podpis autora

Bc. Tereza Nogová

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování panu Ing. Antonínu Žákovi, Ph.D. za jeho trpělivost, podporu, cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. a kolektivu spolupracovníků na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií za spolupráci na praktické části této práce. Také bych ráda poděkovala za spolupráci firmě DEKTRADE a.s. za poskytnuté technické zázemí pro vypracování praktické části této diplomové práce. Tímto také děkuji své rodině a svým nejbližším za podporu během celého mého studia.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>12</b>
<b>2 POUŽÍVANÉ METODY VÝZKUMU .....</b>	<b>13</b>
2.1 Literární rešerše .....	13
2.2 Analýza fyzikálních dějů .....	13
2.3 Experimentální měření v laboratorních podmínkách .....	13
2.4 Syntéza dosažených výsledků .....	14
<b>3 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ TEORIE K ŘEŠENÉ PROBLEMATICE .....</b>	<b>15</b>
3.1 Vlhkostní veličiny .....	15
3.2 Elektrické veličiny .....	20
<b>4 POUŽÍVANÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 Metody měření vlhkosti vzduchu .....</b>	<b>23</b>
4.1.1 Hygrometrická metoda.....	23
4.1.1.1 Dilatační vlhkoměr .....	23
4.1.1.2 Odporová metoda .....	24
4.1.1.3 Kapacitní metoda.....	26
4.1.1.4 Vlhkoměr s vyhříványými termistory .....	28
4.1.1.5 Rezonanční metoda.....	29
4.1.2 Psychrometr .....	29
4.1.3 Optická metoda – metoda rosného bodu .....	30
4.1.4 Ostatní metody .....	31
<b>4.2 Metody měření vlhkosti materiálů .....</b>	<b>32</b>
4.2.1 Destruktivní gravimetrická metoda .....	32
4.2.2 Nedestruktivní metody založené na měření elektrických veličin .....	33
4.2.3 Mikrovlnná metoda - nedestruktivní .....	36
<b>5 VÝPOČTOVÉ METODY PRO STANOVENÍ VLHKOSTI V KONSTRUKCI..</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Výpočet podle normy ČSN 73 0540-4 .....</b>	<b>38</b>
5.1.1 Okrajové podmínky.....	38
5.1.2 Difúzní odpor konstrukce .....	38
5.1.3 Částečný tlak vodní páry v konstrukci.....	39
5.1.4 Kondenzace vodní páry v konstrukci, tlaková podmínka .....	41
5.1.5 Oblast kondenzace .....	42
5.1.6 Roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry .....	43
<b>5.2 Výpočet podle normy ČSN EN ISO 13788 .....</b>	<b>44</b>
5.2.1 Okrajové podmínky.....	45
5.2.2 Začátek výpočtu, počáteční měsíc .....	45
5.2.3 Rozdělení stavební konstrukce, tepelný odpor, ekvivalentní difúzní tloušťka.....	45
5.2.4 Rozložení teploty a částečného tlaku nasycené vodní páry .....	46
5.2.5 Výpočet zkondenzovaného množství .....	47



5.2.6 Vypařování .....	48
5.2.7 Posouzení konstrukcí .....	48
<b>5.3 Numerické metody .....</b>	<b>49</b>
5.3.1 WUFI Pro.....	49
5.3.2 CalA.....	50
5.3.3 Delphi .....	51
<b>6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>52</b>
<b>6.1 Úvod .....</b>	<b>52</b>
<b>6.2 Cíle .....</b>	<b>52</b>
<b>6.3 Seznam používaných měřicích zařízení .....</b>	<b>52</b>
<b>6.4 Vývoj senzorů.....</b>	<b>53</b>
6.4.1 Základní předpoklad chování senzorů .....	53
6.4.2 Materiály pro výrobu senzorů .....	54
6.4.3 Popis navržených senzorů.....	55
<b>6.5 Metodika pro ověření funkčnosti a kalibraci senzorů .....</b>	<b>62</b>
<b>6.6 Metodika pro nedestruktivní stanovení kondenzace v modelu konstrukce.....</b>	<b>63</b>
<b>6.7 Výsledky měření .....</b>	<b>65</b>
6.7.1 Výsledky pro ověření funkčnosti a kalibraci senzorů .....	65
6.7.2 Výsledky nedestruktivního stanovení kondenzace v modelu konstrukce .....	73
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>79</b>
<b>8 PŘÍNOSY PRÁCE PRO PRAXI A ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU.....</b>	<b>80</b>
<b>9 DALŠÍ MOŽNOSTI VÝZKUMU.....</b>	<b>81</b>
<b>SEZNAM POUŽITELNÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>82</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>86</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>90</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>94</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>95</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>96</b>
<b>A PŘÍKLAD VÝPOČTU KONDENZACE UVNITŘ KONSTRUKCE.....</b>	<b>96</b>
<b>B POPIS POUŽÍVANÝCH MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>102</b>
<b>C VLASTNOSTI SÁDRY A JEJÍ DRUHY.....</b>	<b>107</b>
<b>D GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZMĚNY ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ SENZORŮ PŘI ODLIŠNÝCH PODMÍNKÁCH TEPLoty A VLHKOSTI VZDUCHU V KLIMATICKÉ KOMOŘE .....</b>	<b>110</b>
<b>E FOTODOKUMENTACE VÝROBY ZJEDNODUŠENÉHO MODELU KONSTRUKCE JEDNOPLÁŠŤOVÉ PLOCHÉ STŘECHY .....</b>	<b>129</b>

## ÚVOD

Vlhkost stavebních konstrukcí je jedním z mnoha problémů, se kterým se velmi často setkáváme. Zvýšená vlhkost v jednotlivých materiálech nebo konstrukcích jako celku nám může nepříznivě ovlivnit jejich vlastnosti, jako jsou:

- únosnost a stabilita,
- tepelně technické vlastnosti,
- poškození materiálů mrazem,
- hygienické prostředí (vznik plísní).

Z těchto důvodů je v normě [10], na niž se odkazuje zákon [15], uvedené maximální množství zkondenzované vodní páry ve stavebních konstrukcích. Dále se v normě uvádí, že u materiálů na bázi dřeva, u kterých by kondenzace mohla způsobit významný defekt, je nutné kondenzaci zcela vyloučit. U jiných materiálů se tato informace neuvádí.

V normě se například nepřihlíží k materiálům, na které má vliv zkondenzované vodní páry v podobě zhoršení izolačních vlastností, jedná se o některé tepelné izolace. Příkladem jsou konstrukce jednoplášťové střechy ve variantách s tepelnou izolací z minerálních vláken a pěnového polystyrénu. U této konstrukce lze dokázat, že kondenzace u minerálních vláken má kondenzát výrazně horší vliv na tepelně izolační vlastnosti než je tomu u konstrukce s pěnovým polystyrénem.

Dále je známo ze zkušeností z praxe, že konstrukce, které neodpovídají kritériím uvedeným v normě, bez problémů fungují. Jedním z příkladů je jednoplášťová plochá střecha s klasickým pořadím vrstev s hydroizolační vrstvou ze dvou asfaltových pásů a parozábranou také z asfaltového pásu se skleněnou vložkou. U takové skladby je obvykle nutné navrhnout parozábranu s asfaltového pásu s hliníkovou vložkou i přes její nevýhody při realizacích na stavbách.

Tato práce se bude zabývat hodnocením teoretických a experimentálních metod pro zjišťování kondenzace difundované vodní páry v konstrukci.

Teoretická část práce pojednává jak o zjednodušených výpočtových metodách pro stanovení oblasti a míry kondenzace uvedené v normách [18] a [19],

tak podrobnějšími numerickými simulacemi. Dále bude provedena analýza známých experimentálních metod pro stanovení vlhkosti v konstrukci.

Experimentální část je zaměřena na vývoj vlastní metody kalibrace a měření vlastního senzoru pro monitorování kondenzace vodní páry v konstrukci.

Elektronické části senzorů byly zhotoveny dle našich požadavků na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, která nám také poskytla zázemí měřicí aparatury. Chladicí aparatura pro nedestruktivní měření kondenzace, byla vyvinuta jako bakalářská práce studenta Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Tomáše Vody ve spolupráci s firmou DEKTRADE a.s.

Diplomová práce vzniká pro budoucí výzkumné účely v rámci Experimentálního centra společnosti DEKTRADE a.s., které bude zaměřeno na testování reálného fungování stavebních konstrukcí z pohledu tepelné techniky.

## 1 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavními cíli diplomové práce jsou:

1. orientace v tepelně technických výpočtech vlhkosti a stanovených kritérií;
2. orientace v problematice samotného měření vlhkosti;
3. vývoj snímače pro detekci a kvantifikaci rovinné kondenzace na rozhraní dvou vrstev;
4. testování v klimatické komoře pro ověření funkčnosti a citlivosti snímače při vystavení určitým teplotám a relativním vlhkostem vzduchu mimo oblast kondenzace;
5. kalibrace snímače v klimatické komoře mimo oblast kondenzace;
6. vývoj metody pro ověření funkčnosti a kalibrace senzoru i v oblasti kondenzace;
7. naznačení směrů dalšího výzkumu.

## 2 POUŽÍVANÉ METODY VÝZKUMU

Pro dosažení cílů bylo použito následujících metod:

- literární rešerše;
- analýza fyzikálních dějů;
- experimentální měření v laboratorních podmínkách;
- syntéza dosažených výsledků.

### 2.1 Literární rešerše

Před sepsáním této práce byla provedena rešerše informací a literatury k porozumění dané problematice. Na dostupné informace navazují a rozšiřují je o své vlastní poznání.

### 2.2 Analýza fyzikálních dějů

V kapitole 3 Základní fyzikální teorie k řešené problematice a v příloze A Příklad výpočtu kondenzace uvnitř konstrukce je uveden výčet základních fyzikálních dějů, které se vztahují k tepelně vlhkostní problematice.

### 2.3 Experimentální měření v laboratorních podmínkách

Experimentální měření bylo provedeno v laboratorních podmínkách na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, kde bylo využito vybavení laboratoří v podobě elektronických přístrojů pro měření elektrických veličin. První měření spočívalo v testování vyrobených snímačů v klimatické komoře. Následné měření na zmenšeném modelu simulovalo reálné podmínky v interiéru a exteriéru s uvažováním kondenzace vodní páry v části konstrukce ploché střechy.

Naměřená data v experimentálním měření poskytují především podklad pro ověření vhodnosti používaných metod a vyrobených snímačů.

## **2.4 Syntéza dosažených výsledků**

Souhrn dosažených výsledků poskytuje přehled ve výhodách a nevýhodách použitých metod, vyrobených snímačů a udává poznatky pro další vylepšení měření.

### 3 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ TEORIE K ŘEŠENÍ PROBLEMATICE

Základní fyzikální teorie o vlhkostní problematice byla převzata z literatury [2], [3], [4], [5] a [6]. Základní fyzikální teorie o problematice elektrických veličin byla převzata z literatury [32] a [33].

#### 3.1 Vlhkostní veličiny

Vlhkost vzduchu je základní meteorologický prvek, který udává množství vody v plynném skupenství (vodní páry) ve vzduchu. Vodní pára se nachází především ve spodních vrstvách atmosféry a vzniká vypařováním z vodních ploch a toků, živočichů, rostlin apod. Při určité teplotě je vzduch schopen pojmout jen určité množství vodní páry, množství vodní páry se tedy nemůže zvětšovat neomezeně, ale jen do stavu nasycení vzduchu vodní parou. Při vyšších teplotách je potřeba větší množství vodní páry pro nasycení vzduchu.

Množství vodní páry ve vzduchu můžeme vyjádřit pomocí vlhkostních veličin, jako jsou např. difuzní tok, částečný tlak vodní páry, absolutní vlhkost, relativní vlhkost a mnoho dalších, které najdeme v normě [3], [1, 2].

##### Difuzní tok

Množství vodní páry v kg, které se šíří difúzí za jednotku času, značíme  $\dot{g}$  [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

##### Hustota difuzního toku vodní páry; hustota difuzního toku

Množství vodní páry, které se šíří difúzí plochou za jednotku času z místa s vyšším částečným tlakem vodní páry do místa s nižším částečným tlakem vodní páry.

Stanovení z výpočtu se znalostmi veličin vztažených k částečnému tlaku vodní páry:

$$g = \frac{\dot{g}}{A} \text{ popř. } g = W_p \cdot \Delta p_v \text{ popř. } g = \frac{\Delta p_v}{Z_p} \text{ popř. } g = \delta_a \cdot \frac{\Delta p_v}{s_d} \quad (1)$$

kde  $\dot{g}$  je difuzní tok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ];



$A$  plocha kolmá na difuzní tok [ $\text{m}^2$ ];

$W_p$  propustnost vodní páry vztažená k částečnému tlaku vodní páry [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ] = [ $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ];

$\Delta p_v$  rozdíl částečných tlaků vodní páry mezi prostředími oddělenými vrstvou materiálu [Pa];

$Z_p$  difuzní odpor vztažený k částečnému tlaku vodní páry [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] = [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\delta_a$  součinitel difuzní vodivosti vzduchu [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ] = [s];

$s_d$  ekvivalentní difuzní tloušťka [m];

Stanovení z výpočtu se znalostmi veličin vztažených k absolutní vlhkosti vzduchu:

$$g = W_v \cdot \Delta v \text{ popř. } g = \frac{\Delta v}{Z_v} \quad (2)$$

kde  $W_v$  je propustnost vodní páry vztažená k absolutní vlhkosti vzduchu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\Delta v$  rozdíl absolutní vlhkosti vzduchu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$Z_v$  difuzní odpor vztažený k absolutní vlhkosti vzduchu [ $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

### Částečný tlak vodní páry

Tlak vodní páry ve směsi suchého vzduchu a vodní páry, značíme  $p_v$  [Pa].

### Částečný tlak nasycené vodní páry

$p_{v,\text{sat}}$  [Pa], tlak vodní páry, kdy je vzduch o teplotě  $\theta_a$  vodní párou nasycen a jeho relativní vlhkost je právě  $\phi_a = 100 \%$  [3].

### Absolutní vlhkost vzduchu

Pomocí absolutní vlhkosti  $\Psi$  vyjadřujeme množství vodní páry ve vzduchu. Absolutní vlhkost určuje hmotnost vodní páry (v kilogramech) uvnitř jednotkového objemu vzduchu ( $1\text{m}^3$ ) v jeho aktuálním termodynamickém stavu.

$$\Psi = \frac{m}{V} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3)$$

Absolutní vlhkost můžeme považovat za hustotu vodní páry.

$$\psi = \frac{m}{V} = \rho \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (4)$$

Množství vodní páry ve vzduchu je omezená. Při určité teplotě vzduchu může být v objemu  $V$  jen maximální množství vodní páry o hmotnosti  $m_{\max}$ , tento stav se označuje jako nasycený a odpovídá mu absolutní vlhkost nasyceného stavu vyjádřená vztahem

$$\psi_{\max} = \frac{m_{\max}}{V} = \rho_{\max} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]. \quad (5)$$

kde  $m$  je hmotnost vodní páry [kg, respektive g];

$V$  objem vzduchu [ $\text{m}^3$ ], [2, 3].

### Relativní vlhkost vzduchu

S relativní vlhkostí vzduchu se setkáváme nejčastěji, značíme ji řeckým písmenem  $\varphi$  a je udávána v %. Vyjádříme ji jako poměr nenasyčeného stavu vodní páry ke stavu nasycenému při stejné teplotě

$$\varphi = \frac{\psi}{\psi_{\max}} = \frac{m}{m_{\max}} = \frac{\rho}{\rho_{\max}} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{\psi}{\psi_{\max}} \cdot 100 [\%] = \frac{m}{m_{\max}} \cdot 100 [\%] = \frac{\rho}{\rho_{\max}} \cdot 100 [\%]. \quad (7)$$

Relativní vlhkost tedy můžeme vypočítat poměrem aktuální hmotnosti  $m$  vodní páry a saturované hmotnosti  $m_{\max}$  při stejné teplotě nebo pomocí parciální hustoty vodní páry v nenasyčeném stavu  $\rho$  a parciální hustoty nasycené vodní páry  $\rho_{\max}$  [2, 4].

Dalším způsobem jak můžeme vyjádřit relativní vlhkost je pomocí parciálních tlaků. Známe-li relativní vlhkost dané místnosti, můžeme si snadno dopočítat parciální tlak vodní páry [2, 4].

$$p = \varphi \cdot p_{\max} \rightarrow p = \frac{\varphi [\%]}{100} \cdot p_{\max} \quad (8)$$

### Faktor difuzního odporu

Jedná se o bezrozměrnou vlhkostní veličinu, značíme ji řeckým písmenem  $\mu$  [-]. Vyjadřuje schopnost vrstvy materiálu propouštět vodní páru difuzí, vypočteme ji jako poměr difuzního odporu daného materiálu a difuzního odporu vzduchu o stejné tloušťce, při smluvních podmínkách. Vztahem je definována takto:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (9)$$

kde  $\delta_a$  je součinitel difuzní vodivosti vzduchu  $[\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}] = [\text{s}]$ ;

$\delta$  součinitel difuzní vodivosti materiálu  $[\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}] = [\text{s}]$ , [3].

### Ekvivalentní difuzní tloušťka

Tuto veličinu značíme  $s_d$  [m], jedná se o tloušťku nehybné vrstvy vzduchu, která má stejný difuzní odpor jako předmětná vrstva materiálu. Slovně můžeme tuto veličinu popsat jako součin faktoru difuzního odporu materiálu s tloušťkou materiálu. Čím vyšší je ekvivalentní difuzní tloušťka, tím složitější je prostupnost pro vodní páru tímto materiálem. Vysoké číslo, ale ne vždy naznačuje kvalitní parotěsnou vrstvu. Existují parobrzdy, které mají hodnotu  $s_d$  proměnnou v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu.

$$s_d = \mu \cdot d \text{ popř. } s_d = \delta_a \cdot Z_p \quad (10)$$

kde  $\mu$  je faktor difuzního odporu [-];

$d$  tloušťka vrstvy [m];

$\delta_a$  součinitel difuzní vodivosti vzduchu  $[\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}] = [\text{s}]$ ;

$Z_p$  difuzní odpor – schopnost materiálu propouštět vodní páru difuzí  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ , [3,5].

### Teplota rosného bodu

Jedná se o teplotu,  $\theta_w$  [°C], při které je dosaženo nasycení vzduchu vodní párou, další vodní pára v těchto podmínkách kondenzuje v kapalnou vodu [3].

### Hmotnostní vlhkost

Obsah volné vlhkosti obsažené v materiálu, vyjadřujeme v procentech hmotnosti materiálu v suchém stavu. Je definována vztahem:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (11)$$

kde  $m$  je hmotnost materiálu ve vlhkém stavu [g];

$m_0$  hmotnost materiálu v suchém stavu (zdánlivě suchém stavu, tj. stav dosažený sušením materiálu při teplotě nižší než 105 °C ±2 °C) [g].

### Sorpční hmotnostní vlhkost

Ustálená hodnota hmotnostní vlhkosti materiálu obklopeného vzduchem se stálou relativní vlhkostí a teplotou, která se ustálí v původně vysušeném materiálu. Můžeme ji definovat vztahem:

$$u_{sb} = \frac{m_e - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

kde  $m_e$  je rovnovážná hmotnost materiálu ve vlhkém stavu dosažená sorpcí [g];

$m_0$  hmotnost materiálu v suchém stavu [g], [3].

### Kondenzace

Kondenzace, známé také jako kapalnění, je přeměna látky, při které se plyn změní na kapalinu, v našem případě se vodní pára přemění ve vodu. Kondenzace vzniká při určitých podmínkách, tou nejdůležitější je, aby teplota míst, kde kondenzace nastává, klesla pod teplotu rosného bodu obklopujícího vzdušného prostředí. Vodní pára přivedená do nasyceného vzduchu tak zkondenzuje v podobě kapiček vody, jinovatky nebo mlhy.

Kritickými místy v budovách, kde ke kondenzaci dochází, jsou např. vnitřní povrchy některých stěn, rohů, koutů, tepelných mostů, tepelných vazeb nebo prostory uvnitř konstrukcí – opláštění budov a střech nebo na rozhraní dvou materiálů v konstrukci se zvyšujícím se difúzním odporem směrem k exteriéru.

Známe dva druhy kondenzace - povrchovou a kondenzaci uvnitř konstrukce [4, 6].

#### *Povrchová kondenzace*

Je druh kondenzace, ke které dochází na povrchu konstrukce. Nastává tehdy, je-li teplota povrchu daného tělesa nižší než teplota rosného bodu obklopujícího vzduchu. Při povrchové kondenzaci nás z důvodu zařídění nežádoucího jevu může zajímat množství vody vyloučené na ploše jednoho metru čtverečního za jednotku času.

#### *Kondenzace uvnitř konstrukce*

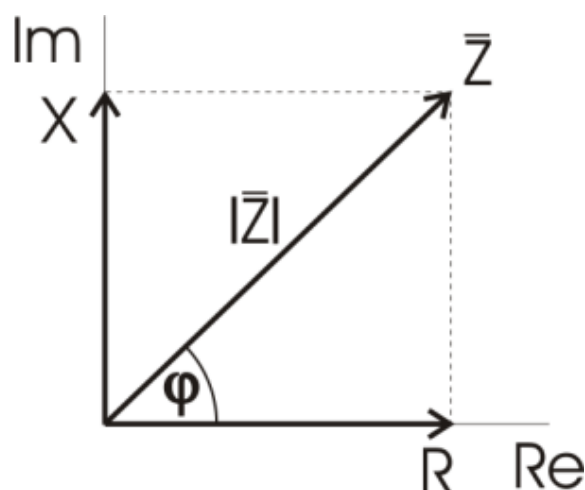
Předpokladem pro kondenzaci uvnitř konstrukce je také dosažení teploty rosného bodu, ale uvnitř konstrukce. Vodní pára musí proniknout materiálem, za předpokladu sendvičové konstrukce určitými vrstvami, a dosáhnout oblasti, kde je teplota pod teplotou rosného bodu. Další podmínkou pro kondenzaci uvnitř konstrukce je existence difúzního toku, který směřuje do prostředí s nižšími teplotami [4].

### **3.2 Elektrické veličiny**

Při zjišťování vlhkosti použijeme metody, které využívají měření elektrických veličin, proto si jejich definice nyní připomeneme.

#### **Impedance**

Tato fyzikální veličina je vyjádřena komplexním číslem, obsahuje tedy reálnou a imaginární složku. Elektrická impedance popisuje odpor a fázový posun napětí při průchodu střídavého elektrického proudu o dané frekvenci. Grafické znázornění je na obrázku 1, impedance se značí jako vektor  $Z$ , jednotkou je ohm [32].



Legenda:

Re – reálná složka

Im – imaginární složka

$\bar{Z}$  – elektrická impedance

R – elektrický odpor

Obr. 1 Grafické znázornění impedance [32]

### Elektrický odpor

Tato fyzikální veličina charakterizuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Je závislá na teplotě, materiálu, délce průřezu vodiče. S rostoucí délkou vodiče odpor roste, s rostoucím průřezem vodiče odpor klesá, vztah tedy můžeme vyjádřit takto:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (13)$$

kde R je elektrický odpor materiálu [ $\Omega$ ];

$\rho$  měrný odpor [ $\Omega \cdot \text{m}$ ];

L délka vodiče [m];

A průřez vodiče [ $\text{m}^2$ ].

Elektrický odpor je závislý i na teplotě, tuto závislost můžeme vyjádřit vztahem:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (14)$$

kde R je elektrický odpor materiálu [ $\Omega$ ];

$R_0$  elektrický odpor při teplotě  $T_0$  [ $\Omega$ ];

$\Delta T = (T - T_0)$

$\Delta T$  rozdíl teplot [K];

$T_0, T$  počáteční a konečná teplota [K];

$\alpha$  teplotní součinitel elektrického odporu, který udává změnu odporu při narůstání teploty o 1 stupeň Kelvina [33].

### Elektrická kapacita

Je-li vodič s elektrickým nábojem nabit, získá elektrický potenciál. Velikost náboje na získání stejného potencionálu se liší podle těles. Záleží na tvaru, velikosti a na prostředí, ve kterém se těleso nachází. Elektrická kapacita vyjadřuje množství elektrického náboje, které je těleso schopno přijmout při dané hodnotě potenciálu [33].

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad (15)$$

kde  $C$  je elektrická kapacita [F];

$Q$  elektrický náboj [C];

$\varphi$  elektrický potenciál [V].

Kapacita je vlastností každého vodiče, ale její využití nalezneme převážně v kondenzátorech. Zde je kapacita definována jako množství náboje na deskách kondenzátoru, jestliže je mezi deskami jednotkové elektrické napětí 1 V. Také zde platí přímá úměra mezi kapacitou kondenzátoru a účinnou plochou desky a nepřímá úměra mezi kapacitou a vzdálenostmi mezi deskami [33].

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (16)$$

kde  $C$  je elektrická kapacita [F];

$\varepsilon_0$  permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ) [ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ];

$\varepsilon_r$  relativní permitivita prostředí mezi deskami kondenzátoru [ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ];

$S$  účinná plocha desek [ $\text{m}^2$ ];

$d$  vzdálenost mezi deskami [m].



## **4 POUŽÍVANÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI**

Tato kapitola se dělí na dvě podkapitoly. V první podkapitole budou uvedeny metody pro měření vlhkosti vzduchu, v té druhé budou uvedeny metody pro měření vlhkosti v materiálech.

### **4.1 Metody měření vlhkosti vzduchu**

Snímače k měření vlhkosti vzduchu a plynů obecně se používají v mnoha oborech. V každém z nich jsou na vlhkoměry kladeny odlišné požadavky na rozměry, přesnost, stabilitu, rychlost odezvy, odolnost proti vodě, odolnost proti chemikáliím a na náklady na pořízení a samotné měření. Tato kapitola popisuje jednotlivé metody měření vlhkosti vzduchu, jejich použití, výhody a případné nevýhody [7].

#### **4.1.1 Hygrometrická metoda**

Metody spadající do této skupiny mají jedno společné – po absorbování určitého množství vody se změní fyzikální nebo chemické vlastnosti daného materiálu. Požadavky kladené na tyto senzory jsou např. rychlá odezva ve směru sorpce i desorpce, dostatečně velká lineárně závislá změna na relativní vlhkosti nebo na rosném bodu, možné měření v širokém teplotním rozmezí a zanedbatelný vliv teploty. [7]

##### **4.1.1.1 Dilatační vlhkoměr**

Typickým představitelem tohoto vlhkoměru je vlasový vlhkoměr. Lidský vlas, který je odmaštěn pomocí např. éteru pro vylepšení vlastností, změní svou délku o 2,5 – 3% při změně relativní vlhkosti z 0 na 100%. Vlas je uchycen a napnut v přístroji tak, aby ho obklopoval vzduch, jehož vlhkost měříme. Změnu délky poté měříme pomocí převodu z pákového mechanismu na ručkový ukazatel, který nám udává relativní vlhkost již v procentech (obr. 2).



Obr. 2 Vlasový vlhkoměr [35]

Výhodou tohoto vlhkoměru je vysoká přesnost měření i při teplotách pod bodem mrazu. Nevýhodou je choulostivost těchto přístrojů, max. teplota použití do 80 °C, nutnost časté regenerace, která by měla probíhat tak, že se čidlo po dobu několika hodin vystaví vysoké vlhkosti. Dále s nimi nelze měřit vlhkost proudících plynů.

Alternativou lidských vlasů pro dilatační vlhkoměr mohou být živočišné blány nebo syntetické organické látky napnuté v rámečku, které se po absorpci vlhkosti prohýbají. Jejich nevýhodou je menší životnost a tudíž menší přesnost, ale výhodou je jednoduché provedení.

Použití těchto vlhkoměrů je převážně v meteorologii – zapisovací vlhkoměr a v přístrojích pro laiky – pokojový vlhkoměr [7, 8].

#### 4.1.1.2 Odporová metoda

Tato metoda měří změnu elektrického odporu podle obsahu absorbované vody. Odporové vlhkoměry můžeme rozdělit do dvou skupin, s kapalným elektrolytem a tuhým elektrolytem.

Zástupcem odporového vlhkoměru s kapalným elektrolytem je vlhkoměr, který je vyroben z izolantu ve tvaru válce. Tento válec je obalen tkaninou, která je napuštěna vodným roztokem z chloridu lithného. Platinové elektrody jsou

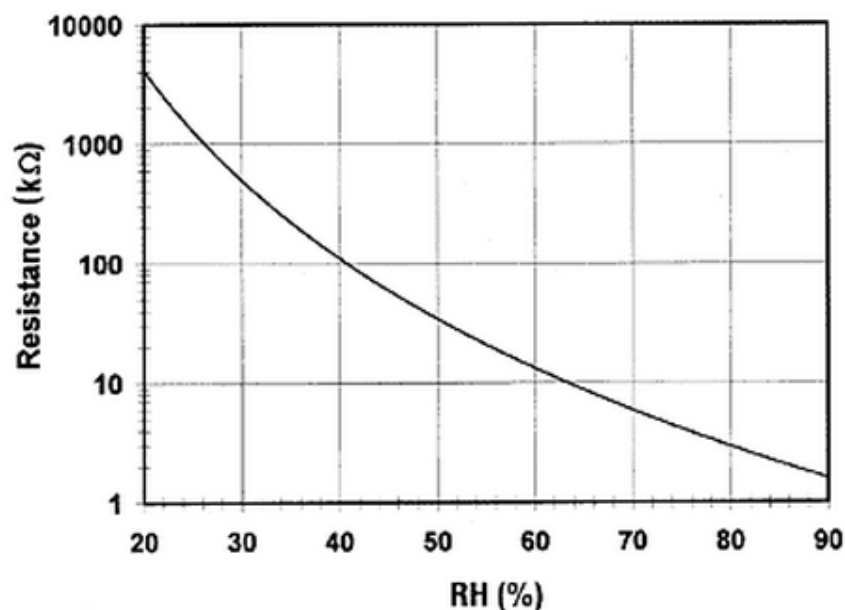
ve tvaru spirály umístěné rovnoběžně na válci izolantu. Při měření budou elektrody napojeny na střídavý proud. Rovnovážný stav obsahu vody v elektrolytu je závislý na teplotě samotného elektrolytu a ta je závislá na parciálním tlaku vodních par okolního vzduchu.

Vlhkoměr s tuhým elektrolytem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je vyroben ze dvou hliníkových elektrod. Jedna je opatřena tenkou vrstvou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a druhá tenkou vrstvičkou zlata propustné pro vodní páru. Elektrický odpor se mění absorpcí vody do elektrolytu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pak můžeme vyhodnotit vlhkost. Příklad odporového čidla vlhkosti je znázorněn na obrázku 3.



Obr. 3 Odporové čidlo vlhkosti [36]

Při odporové metodě musíme měřit i teplotu vzduchu. Velikost elektrického odporu je závislá na relativní vlhkosti i teplotě. Závislost elektrického odporu a relativní vlhkosti můžeme znázornit přibližně pomocí exponenciály (obr. 4). Výhodou odporové metody je velká přesnost, nevýhodou je citlivost senzoru na kondenzaci a nevyužití při vyšších teplotách [7, 8].



Obr. 4 Charakteristika odporových senzorů [7]

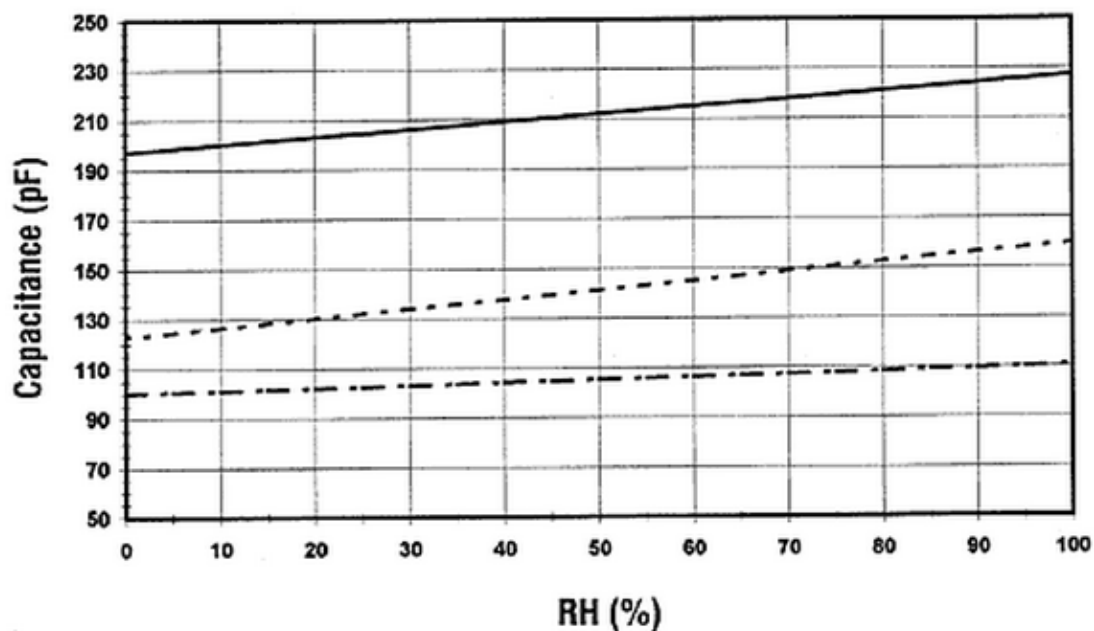
#### 4.1.1.3 Kapacitní metoda

Tato metoda je velmi podobná metodě odporové, je založena na měření změny kapacity a elektrického odporu vlivem sorpce vlhkosti. Každý senzor se skládá z dielektrika, které je tvořeno tenkou vrstvou materiálu absorbujícího vlhkost. Z každé strany dielektrika se nachází elektroda, jedna je perforovaná, umožňuje tak okolnímu vzduchu kontakt s dielektrikem. Druhá elektroda perforovaná není nebo být nemusí. Množství absorbované vody může být poměrně malé, přesto je změna kapacity dobře měřitelná. Příklad kapacitního čidla vlhkosti je znázorněn na obrázku 5.



Obr. 5 Kapacitní polymerové čidlo [37]

Tato metoda se může použít pro výrobu senzorů s integrovaným zpracováním signálu, kde výstupem bude elektrické napětí. Dnes se vyrábějí tzv. dataloggery, které zaznamenají do své paměti časový průběh vlhkosti, ale i teploty vzduchu, případně dalších veličin. Uložená data se dají pohodlně přenést do počítače.



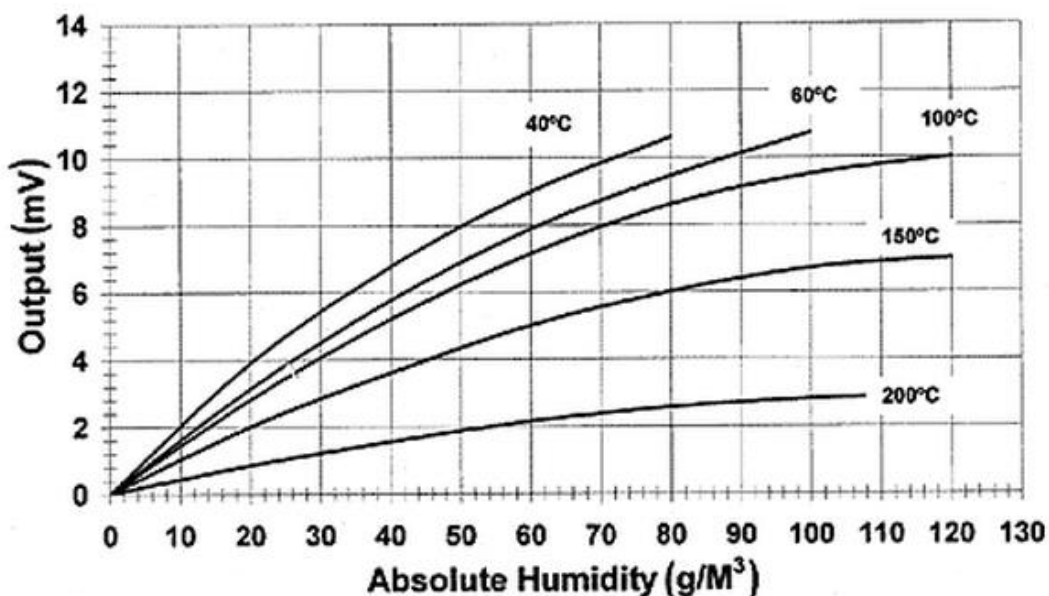
Obr. 6 Téměř lineární závislost kapacitních čidel na relativní vlhkosti při 25°C [7]

Výhodou této metody je velká citlivost, nízká závislost na teplotě, odolnost vůči kondenzaci, můžeme měřit vlhkost plynů i kapalin, nízká cena, závislost kapacity senzoru a relativní vlhkosti je téměř lineární (obr. 6). Nevýhodou může být považována delší odezva senzoru v řádu desítek sekund [7, 8].

#### 4.1.1.4 Vlhkoměr s vyhřívajícími termistory

Každý senzor je složen ze dvou stejných termistorů, jeden je obklopen okolním prostředím, jehož vlhkost je měřena, druhý je hermeticky uzavřen v suchém dusíku. Termistory jsou zapojeny do série, tvoří jednu větev můstku. Druhá větev obsahuje pevné rezistory a pasivní elektronickou součástku určenou k nulování tzv. trimr. Při průchodu elektrického proudu se termistory zahřívají, dosažená teplota je závislá na jejich ochlazování, tzn. na tepelné vodivosti okolního plynu. Metoda používá závislost tepelné vodivosti vzduchu na jeho vlhkosti (obr. 7). Vynulování můstku dosáhneme vložením senzoru do suchého vzduchu a trimrem se nastaví nula. Poskytnutý signál senzoru je přímo úměrný absolutní vlhkosti.

Výhodou této metody je použitelnost při vysokých teplotách až 200 °C a odolnost proti chemickým látkám [7].



Obr. 7 Charakteristika vlhkoměrů s vyhřívajícími termistory [7]

#### 4.1.1.5 Rezonanční metoda

Vlhkost materiálu je ovlivněna absorbovaným množstvím vody. Pro funkčnost metody musí být množství sorbentu malé, aby neovlivňovalo koncentraci vodních par v měřeném plynu, dále musí být zajištěna rychlá odezva měření změn hmotnosti.

Princip metody je založen na oscilacích, proto je měřicí obvod sestaven z oscilátoru, do kterého jsou zapojeny elektrody křemíkového výbrusu. Frekvence výstupního vysokofrekvenčního napětí je závislá na mechanických vlastnostech (rozměry, hmotnost, úhel) křemíkového výbrusu. Při zjednodušených podmínkách platí:

$$\Delta f = K - \Delta m \quad (17)$$

$$K = \frac{f^2}{N \cdot \rho \cdot S} \quad (18)$$

kde  $\Delta f$  je změna frekvence způsobená změnou hmotnosti o  $\Delta m$  [Hz],

$f$  vlastní frekvence oscilátoru [Hz],

$N$  frekvenční konstanta závislá na úhlu řezu,

$\rho$  hustota křemene [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$S$  plocha výbrusu [ $\text{m}^2$ ],

$K$  konstanta úměrnosti, [7].

#### 4.1.2 Psychrometr

Vlhkost vzduchu stanovíme měřením teplot. Teploty budou měřeny na dvou teploměrech, které by měly být stejné, kapalinové (např. rtuťové), umístěné vedle sebe cca 3 – 5 cm. Jeden teploměr bude obklopen pouze okolním prostředím, tedy vzduchem a bude nazýván suchým teploměrem. Druhý teploměr je obalen punčoškou z textilie, která je po celou dobu měření navlhčena destilovanou vodou. Měření je tedy provedeno pomocí suchého a vlhkého teploměru. Vlhkost vzduchu se dozvíme z rozdílu teplot těchto dvou teploměrů. Na vlhkém teploměru je nižší teplota, protože při odpařování vody



z textilie dochází k odebrání tepla z čidla teploměru. Čím nižší je vlhkost vzduchu, tím větší bude rozdíl naměřených teplot. Naopak při 100% vlhkosti vzduchu by zůstaly teploty na obou teploměrech stejné, vlhkost z textilie by se neměla kam odpařovat.

V praxi se setkáváme se dvěma druhy psychrometrů, Augustův psychrometr pracuje na stejném principu, jako byl popsán výše. Assmanův psychrometr nebo také aspirační psychrometr je navíc doplněn ventilátorem, který zaručuje proudění vzduchu kolem teploměrů. Oba dva typy psychrometrů jsou vidět na obrázku 8. Výhoda této metody tkví v jednoduchosti. Nevýhodou profesionálních přístrojů jsou vysoké pořizovací náklady [11, 12].



Obr. 8 Augustův a Assmanův psychrometr [13]

#### 4.1.3 Optická metoda – metoda rosného bodu

Vlhkost vzduchu můžeme určit početně nebo graficky pomocí dvou veličit - teploty vzduchu a teploty rosného bodu neboli teploty zrcátka. Grafická metoda využívá Mollierova diagramu.

Optická metoda využívá kovové zrcátko, které je ochlazováno Peltierovým článkem. Na povrchu zrcátka dojde k orosení. Zrcátko zároveň slouží k odražení světelných paprsků z LED diody do snímače. Pokud je povrch zrcátka orosen, snímač vyhodnotí, že světelný tok paprsku má menší intenzitu a můžeme odečíst teplotu rosného bodu.

Přístroj může být konstruován tak, že světelný paprsek LED diody je odražen proti tmavé ploše. Při orosení zrcátka se tedy intenzita dopadajícího světla na snímač zvýší. Vyhodnocení vlhkosti je stejné jako u předcházející konstrukce přístroje [8].

#### **4.1.4 Ostatní metody**

Tyto metody už nepatří do skupiny hygrometrických metod, tedy těch, kde jsme k měření vlhkosti vzduchu využívali změnu vlastností nějakého materiálu po absorpci vody.

##### **4.1.4.1 Elektrolytická metoda**

Senzor je sestaven ve skleněné trubičce s navléknutou skleněnou tkaninou. Ta je napuštěna vodním roztokem chloridu lithia ( $\text{LiCl}$ ) a jsou do ní umístěny dvě platinové elektrody. Součástí senzoru je odporový teploměr, který snímá teplotu vodního roztoku. Elektrodami prochází střídavý proud a tak dochází k zahřívání roztoku a odpařování a zvyšování vlhkosti vzduchu. Elektrolyt pohlcuje vlhkost ze vzduchu, tím se zvyšuje jeho vodivost i procházející proud. Takto se elektrolyt stále zahřívá až do rovnovážné teploty elektrolytu, která závisí na parciálním tlaku vodní páry okolního prostředí, vzduchu. Pro měření je nutné znát i teplotu vnějšího vzduchu. Elektrolytický vlhkoměr je znázorněn na obrázku 9.

Výhody této metody jsou velká přesnost až 1%, dlouhodobá stabilita senzoru a rychlá odezva senzoru. Nevýhodou je snížená životnost kvůli zanesení elektrolytu nečistotami a tedy jeho potřebná obnova [7].



Obr. 9 Elektrolytický vlhkoměr [38]

#### 4.1.4.2 Metoda s využitím záření

Poslední metodou je metoda, která využívá ultrafialového nebo infračerveného záření. Vzduch obsahující vodní páru pohlcuje záření, čím víc je nasycený tím méně záření jím projde. Ultrafialové záření se měří na vlnových délkách 121 nebo 123 nm, infračervené záření se měří na vlnové délce 6,25  $\mu\text{m}$ . Výstupem je absolutní vlhkost vzduchu. Výhodou této metody je velmi krátká doba odezvy měření, nevýhodou vysoká cena [17].

## 4.2 Metody měření vlhkosti materiálů

Měření vlhkosti materiálů obvykle funguje na stejném principu jako měření vlhkosti vzduchu. Cílem je však vždy zjistit objem vody kapalně nebo plynné (tedy vodní páry) v daném materiálu.

### 4.2.1 Destruktivní gravimetrická metoda

Tuto metodu můžeme znát také pod názvem vážková nebo váhová metoda, protože důležitým krokem této metody je vážení vzorků. Přesný způsob postupu měření pro jednotlivé stavební materiály je uvedený v normě [16].

Obecně lze postup této metody popsat tak, že vzorek se po odběru ze stavební konstrukce zváží. Nechá se během určité doby vysušit a po dosažení neměnné hmotnosti se opět zváží. Původní obsah vlhkosti se vypočítá pomocí rozdílů hmotnosti dle vztahu:

$$\varphi = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (19)$$

kde  $m$  je hmotnost vlhkého (původního) materiálu/vzorku [kg],

$m_0$  hmotnost vysušeného materiálu/vzorku [kg].

Pokud je materiál sypký, může se nám změna vlhkosti projevit na změně objemu materiálu. Poté použijeme pro vyjádření vlhkosti v původním vzorku tento vztah:

$$\Psi = \frac{V_w}{V} \cdot 100 [\%] \quad (20)$$

kde  $\Psi$  je objemová vlhkost původního materiálu/ vzorku,

$V_w$  objem volné vlhkosti v materiálu zjištěné sušením [m<sup>3</sup>],

$V$  objem materiálu [m<sup>3</sup>].

Nevýhodou této metody je časová náročnost a proveditelnost pouze v laboratorních podmínkách. Další velkou nevýhodou této metody je, že zprůměruje zjištěnou vlhkost na celý objem/hmotnost vzorku i když se vlhkost může ve skutečnosti nacházet pouze v určité oblasti vzorku. Tato metoda se využívá především pro kalibraci jiných zařízení. Výhodou této metody je její velká přesnost, pokud jsou k dispozici váhy s velkou přesností [3, 8, 9].

#### 4.2.2 Nedestruktivní metody založené na měření elektrických veličin

Vlhkost ve stavebních materiálech lze měřit podobně jako vlhkost vzduchu – pomocí změny elektrických veličin. Výhodou je, že se jedná o nedestruktivní metody bez znatelného porušení měřeného vzorku.

### Odporová metoda

Vlhkoměry (obr. 10) pracují na principu měření elektrického odporu (viz kapitola 4.1.1.2). K vlhkoměrům jsou připojeny jehlové elektrody (nebo jsou jejich pevnou součástí), kterými je nutné proniknout do zkoušeného materiálu (dřevo, beton) a zajistit tak dobrý kontakt mezi elektrodou a vodičem – vlhkým materiálem.

Vlhkoměry mají měřicí rozsah od 5 do 90 váhových procent. U vyšších vlhkostí přesnost měření klesá. Výrobce dále uvádí přesnost měření u dřeva 0,2 % a u ostatních stavebních materiálů 0,5 %. Vlhkoměry od jiných výrobců mohou měřit i teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, zaznamenávat naměřená data, která lze snadno přenést do počítače a mít větší rozsah měření vlhkosti.



Obr. 10 Hrotový vlhkoměr pro měření vlhkosti dřeva a stavebních materiálů s měřicími hroty do měkkého dřeva [22]

Výhodou těchto přístrojů je velký výběr podle spolehlivosti, přesnosti, výkonnosti a tomu odpovídající ceny měřidla. Ceny měřidel se pohybují od 500 Kč pro kapesní přístroje do 8000 Kč pro přístroje s integrovaným měřením teploty a vlhkosti vzduchu. Nevýhodou těchto přístrojů je proniknutí hrotů do omezené hloubky zkoušeného materiálu. Omezený měřicí rozsah [22].

### Kapacitní metoda

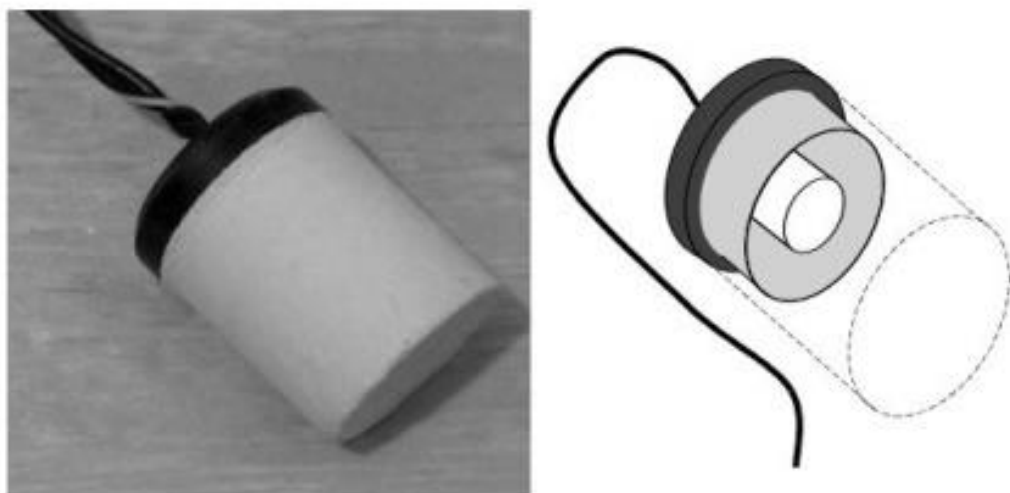
Dalšími přístroji, kterými lze měřit vlhkost dřeva nebo stavebních materiálů, jsou kapacitní vlhkoměry. Nejsou opatřeny hroty, tedy u nich není zapotřebí porušovat zkoušený materiál, ale slouží pouze pro informativní měření. Jeden takový indikátor můžeme vidět na obrázku 11, který indikuje orientačně vlhkost zdiva, omítky betonu a dřeva [22].



Obr. 11 Kapacitní indikátor vlhkosti dřeva a stavebních hmot V303 [34]

### Měření vlhkosti v zemině

Pro měření vlhkosti v zemině existuje několik druhů používaných metod. Jedna z nich měří sací potenciál pomocí sádrového válce (obr. 12). Ten je vyroben kolem dvou soustředných elektrod, tok elektrického proudu tedy probíhá uvnitř sádrového bloku. Sádra na vnějším povrchu působí jako nárazník proti solím, které se mohou v půdě objevovat a mohou mít vliv na elektrickou vodivost a tím zkreslovat výsledky měření. Sádrový válec umístěný v půdě absorbuje okolní vlhkost až do rovnovážného stavu. Po připojení bloku ke zdroji napětí, dojde k propojení mezi elektrodami a k vyhodnocení příslušného elektrického odporu.



Obr. 12 Sádrový válec pro měření vlhkosti v půdě a kresba s umístěním vložených elektrod [24]

Jiná metoda, která měří vlhkost v půdě, pracuje na principu hrotového přístroje. Pomocí dvou zasunutých elektrod kolmo do země, změříme vodivost daného materiálu, který se nachází mezi nimi. Vodivosti jsou převáděny na procentuální obsah vody v půdě [24, 25].

#### 4.2.3 Mikrovlnná metoda - nedestruktivní

Tato metoda se používá především pro sypký materiál (písek, jíl) a je použitelná pouze v laboratorních podmínkách. Vlhkost (především volná voda) v materiálech tlumí mikrovlnné záření, které prochází pórovitou látkou. Orientace molekul vody je v materiálu podle polaritu. Protože pomocí vlnění polaritu měníme, dochází k rozkmitání molekul vody, ty na sebe dále narážejí, až dojde k přeměně mikrovlnné energie na tepelnou a voda se z materiálu vytlačí (respektive vypaří).

Zařízení je sestaveno následovně. Na straně vysílače je mikrovlnný měřič vlhkosti s generátorem a na opačné straně, tedy straně přijímače je přijímací anténa napojena na detekční diodu, která je propojena s vyhodnocovacím voltmetrem. Tuto metodu lze využít při vysoušení zdiva tloušťky okolo 1 m. Využití této metody se uplatnilo po povodních, kdy je zapotřebí během relativně krátké



Výhodou této metody je vysoká citlivost měření a možnost použití v celém objemu látky. Sušení je rovnoměrné, rychlé a úsporné. Nevýhodou metody je nemožnost této metody pro vyhodnocení vlhkosti v terénu, pouze pro vysušení materiálu [23].

## 5 VÝPOČTOVÉ METODY PRO STANOVENÍ VLHKOSTI

### V KONSTRUKCI

Kondenzaci vodní páry uvnitř konstrukce můžeme vypočítat pomocí dvou výpočtových metod, které jsou uvedeny v normách [18] a [19]. Dalšími přesnějšími metodami, které můžeme pro výpočet kondenzace použít, jsou nestacionární numerické metody.

#### 5.1 Výpočet podle normy ČSN 73 0540-4

Zjednodušený stacionární fyzikální model předpovídající rozložení a kondenzaci vodních par, který vychází z tlakové podmínky (viz 5.1.4). Lze jím stanovit výskyt a množství kondenzace vodní páry v konstrukci. Výpočet hodnotí riziko vzniku kondenzace v konstrukci s přihlédnutím na funkčnost samotné konstrukce, její stabilitu, tepelně technické vlastnosti atd. Druhou možností je vypočítat roční bilanci zkondenzované a vypařitelné vodní páry. Tu stanovíme rozdílem ročního množství zkondenzované vodní páry  $M_{c,a}$  a ročního množství vypařitelné vodní páry  $M_{ev,a}$ .

##### 5.1.1 Okrajové podmínky

Pro kondenzaci vodní páry se používají zimní návrhové okrajové podmínky podle normy [14].

##### 5.1.2 Difúzní odpor konstrukce

V konstrukci, kde uvažujeme jednorozměrné šíření vlhkosti, určíme difúzní odpor konstrukce  $Z_p$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] podle vztahu:

$$Z_p = \sum Z_{p,j} \quad (21)$$

kde  $Z_{p,j}$  je difúzní odpor každé  $j$ -té vrstvy konstrukce [ $m \cdot s^{-1}$ ], stanovený ze vztahu:

$$Z_{p,j} = \frac{s_{d,j}}{\delta_a} = \frac{d_j}{\delta} \quad (22)$$

kde  $s_{d,j}$  je ekvivalentní difúzní tloušťka každé  $j$ -té vrstvy konstrukce [m], stanovená ze vztahu:

$$s_{d,j} = \mu_j \cdot d_j \quad (23)$$

kde  $d_j$  je tloušťka každé  $j$ -té vrstvy konstrukce [m];

$\mu_j$  faktor difúzního odporu materiálu každé  $j$ -té vrstvy konstrukce, bezrozměrný, stanovený podle normy [14] ze vztahu:

$$\mu_j = \frac{\delta_a}{\delta_j} \quad (24)$$

kde  $\delta_j$  je součinitel difúzní vodivosti materiálu každé  $j$ -té vrstvy [ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ], popř. [s];

$\delta_a$  součinitel difúzní vodivosti vzduchu [ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ], popř. [s], který závisí na teplotě a atmosférickém tlaku vztahem:

$$\delta_a = \frac{(273,15 + \theta_{j,m})^{0,81}}{5,25 \cdot 10^6 \cdot p_a} \quad (25)$$

kde  $\theta_{j,m}$  je průměrná teplota materiálu  $j$ -té vrstvy [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$p_a$  atmosférický tlak vzduchu [Pa], stanovený přibližně ze vztahu:

$$p_a = 101\,700 \cdot \frac{16\,300 - h}{16\,300 + h} \quad (26)$$

kde  $h$  je nadmořská výška místa konstrukce [m].

### 5.1.3 Částečný tlak vodní páry v konstrukci

Stanovení částečného tlaku vodní páry v konstrukci je dvojí:

a) přibližné a rychlejší, graficko – výpočtovou metodou, kdy si pomocí obrázku znázorníme konstrukci v příčném řezu. Konstrukce je rozdělena do jednotlivých vrstev, které jsou vyneseny vedle sebe v tloušťkách difúzního odporu  $Z_{p1}$ ,  $Z_{p2}$  atd. Částečné tlaky vodní páry nakreslíme jako spojnicí tlaků  $p_i$  a  $p_e$ . Pomocí tohoto náčrtku můžeme odečíst částečný tlak vodní páry v jakémkoliv místě s hodnotou  $p_x$ , kterému odpovídá difúzní odpor  $Z_{px}$ . Viz obrázek 13.

b) přesněji početně podle vztahu:

$$p_x = p_i - \frac{Z_{pi} + Z_{px}}{Z_{pT}} \cdot (p_i - p_e) \quad (27)$$

kde  $p_i$  je částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnitřní straně konstrukce [Pa];

$p_e$  částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnější straně konstrukce [Pa];

$Z_{pT}$  odpor konstrukce při prostupu vodní páry [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], stanovený ze vztahu:

$$Z_{pT} = Z_{pi} + Z_p + Z_{pe}$$

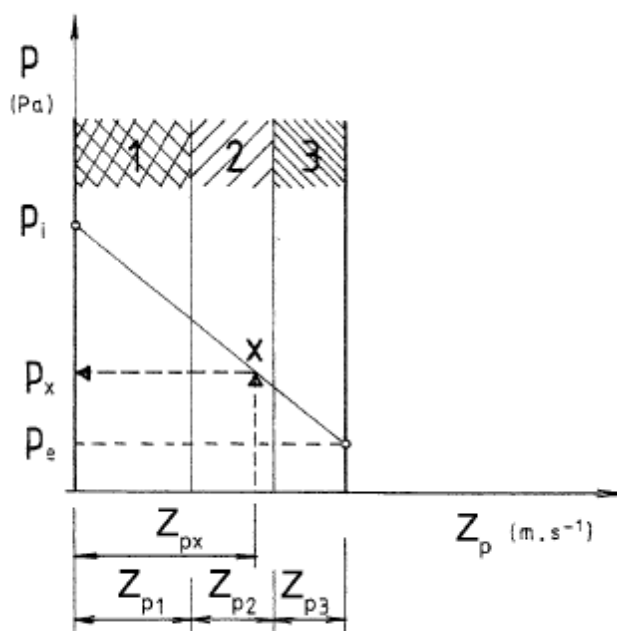
$Z_{pi}$  odpor při přestupu vodní páry na vnitřní straně konstrukce [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$Z_{pe}$  odpor při přestupu vodní páry na vnější straně konstrukce [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$Z_p$  difúzní odpor konstrukce [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$Z_{px}$  difúzní odpor části konstrukce od jejího vnitřního povrchu k místu x [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Pozn.: Hodnoty  $Z_{pi}$ ,  $Z_{pe}$  jsou proti  $Z_p$  velmi malé, proto jsou obvykle ve výpočtu zanedbávány a vztah je tak zjednodušen na  $Z_{pT} = Z_p$



Pozn. Graf zpracován pro  $Z_{p1} \approx 0$ ,  $Z_{pe} \approx 0$

Obr. 13 Stanovení částečného tlaku vodní páry  $p_x$  uvnitř konstrukce

#### 5.1.4 Kondenzace vodní páry v konstrukci, tlaková podmínka

Výskyt kondenzace v kterémkoliv místě v konstrukci posuzujeme tlakovou podmínkou, pokud je podmínka splněna, ke kondenzaci nedochází. Tlaková podmínka má tvar:

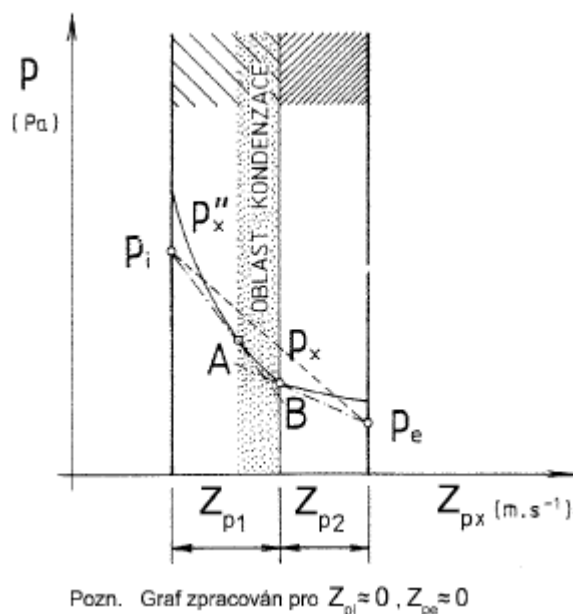
$$p_{\text{sat},x} > p_x \quad (28)$$

kde  $p_{\text{sat},x}$  je částečný tlak nasycené vodní páry v místě  $x$  [Pa];

$p_x$  částečný tlak vodní páry v místě  $x$  [Pa].

Tuto tlakovou podmínku můžeme stanovit dvěma způsoby:

a) přibližně, graficky – výpočtovou metodou. Pomocí grafického znázornění konstrukce v příčném řezu zjistíme, zda lineární závislost částečného tlaku vodní páry uvnitř konstrukce  $p_x$  je nižší než lomená křivková závislost částečného tlaku nasycené vodní páry  $p_{\text{sat},x}$  a to ve všech místech konstrukce – viz obrázek 14. Tloušťka jednotlivých vrstev konstrukce je opět vynesena v difúzních odporech  $Z_{p1}$ ,  $Z_{p2}$  atd.



Obr. 14 Schéma výpočtu a výskytu kondenzace vodní páry v konstrukci, graficko - výpočtová metoda

b) přesněji, numerickou metodou. Každou část konstrukce z určitého materiálu rozdělíme na menší, ale pravidelné mezivrstvy. Jednotlivé mezivrstvy mají tepelný odpor menší než N-tý díl celkového tepelného odporu konstrukce. Tlakové podmínky musí vyhovět každé rozhraní, jednotlivých vrstev i nových mezivrstev.

### 5.1.5 Oblast kondenzace

Nalezení oblasti kondenzace v konstrukci je pokračováním ve výpočtu kondenzace vodní páry v konstrukci, proto ji lze nalézt stejnými dvěma způsoby – graficky nebo počteně.

a) přibližně graficko – výpočtovou metodou. Oblast kondenzace najdeme grafickým znázorněním v obr. 14. Prvním krokem je nakreslení tečen z bodů  $p_i$  a  $p_e$  k lomené křivce  $p_{sat}$ . Pomocí těchto tečen a lomené čáry vzniknou body dotyku – A a B. Po nakreslení rozhraní vedeného těmito body dostaneme vymezenou oblast kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce pro sledovanou teplotu venkovního vzduchu  $\theta_e$ ;

b) přesněji výpočtem. Body dotyku tečen a křivky  $p_{\text{sat}}$  hledáme ve vrstvách konstrukce, ve kterých byl podle tlakové podmínky zjištěn počátek a konec kondenzace.

### 5.1.6 Roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry

Roční bilanci stanovíme výpočtem po měsících podle normy [19], viz níže podkapitola 5.2.6. Druhou možností je výpočet jako rozdíl ročního množství zkondenzované vodní páry  $M_{c,a}$  a ročního množství vypařitelné vodní páry  $M_{ev,a}$  podle normy [18].

Roční bilanci zkondenzované a vypařitelné vodní páry vypočítáme na základě opakovaného výpočtu dílčích množství  $M_{a,j}$  pro jednotlivé teploty venkovního vzduchu  $\theta_{ae,j}$ , které při kroku  $\Delta\theta_e = 5 \text{ K}$  pokrývají rozsah teplot venkovního vzduchu v ročním průběhu.

Dílčí množství zkondenzované nebo vypařitelné vodní páry  $M_{a,j}$ , v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , (podle znaménka) stanovíme:

a) přibližně

$$M_{a,j} = (g_{A,j} - g_{B,j}) \cdot t_{e,j} \quad (29)$$

kde  $g_{A,j}$  je hustota difúzního toku vodní páry, která proudí konstrukcí od vnitřního povrchu k hranici A oblasti kondenzace [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]

$g_{B,j}$  hustota difúzního toku vodní páry, která proudí konstrukcí od hranice B oblasti kondenzace k vnějšímu povrchu [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]

$t_{e,j}$  celková doba trvání teploty venkovního vzduchu  $\theta_{e,i}$  pro  $j$ -tou vrstvu dle normy [14] podle teplotní oblasti v zimním období;

b) přesněji, pro nezastíněné neodvětrané ploché střechy, na které bude po celou dobu jejich životnosti nerušeně dopadat sluneční záření:

$$M_{a,j} = M_{az,j} + M_{aj,j} \quad (30)$$

kde  $M_{az,j}$  je dílčí množství zkondenzované (vypařitelné) vodní páry pro zataženou oblohu, podle vztahu (29) pro dobu trvání zatažené oblohy  $t_{z,j}$  při teplotě venkovního vzduchu při zatažené oblohu  $\theta_{ae,j}$ ;

$M_{aj,j}$  dílčí množství zkondenzované (vypařitelné) vodní páry pro jasnou oblohu, podle vztahu (29) pro dobu trvání jasné oblohy  $t_{i,j}$  při ekvivalentní teplotě venkovního vzduchu při jasné obloze  $\theta_{ae,ev}$ , která se stanoví podle normy [14].

Hustotu difúzního toku vodní páry proudící konstrukcí od vnitřního povrchu k hranici A oblasti kondenzace  $g_A$  [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ], stanovíme ze vztahu:

$$g_A = \frac{p_i - p_{sat,A}}{Z_{pA}} \quad (31)$$

Hustotu difúzního toku vodní páry proudící konstrukcí od hranice B oblasti kondenzace k vnějšímu povrchu  $g_B$  [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ] se stanoví ze vztahu:

$$g_B = \frac{p_{sat,B} - p_e}{Z_{pB}} \quad (32)$$

kde  $Z_{pA}$  je difúzní odpor od vnitřního povrchu konstrukce k hranici A oblasti kondenzace [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$Z_{pB}$  difúzní odpor od hranice B oblasti kondenzace k vnějšímu povrchu konstrukce [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$p_{sat,A}$  částečný tlak nasycené vodní páry na hranici A oblasti kondenzace [Pa];

$p_{sat,B}$  částečný tlak nasycené vodní páry na hranici B oblasti kondenzace [Pa].

Roční množství zkondenzované vodní páry  $M_{c,a}$  je součtem nezáporných hodnot dílčích množství  $M_{aj,j}$ . Roční množství vypařitelné vodní páry  $M_{ev,a}$  je součtem záporných hodnot dílčích množství  $M_{aj,j}$  [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ], [18].

## 5.2 Výpočet podle normy ČSN EN ISO 13788

Výpočet stanovuje roční vlhkostní bilanci a nejvyšší množství akumulované vlhkosti způsobené kondenzací uvnitř konstrukce. Předpokladem výpočtu je vyschnutí veškeré zabudované vlhkosti.



### 5.2.1 Okrajové podmínky

Před zahájením samotného výpočtu stanovíme okrajové podmínky, kterými jsou vnitřní a vnější teploty a vlhkosti prostředí. Vnější podmínky charakterizují umístění budovy. Vnitřní podmínky se volí podle druhu výpočtu a podle očekávaného druhu využití budovy.

Roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry se stanovuje výpočtem po měsících, ve kterých jsou vyžadovány měsíční hodnoty klimatických údajů.

### 5.2.2 Začátek výpočtu, počáteční měsíc

Samotný výpočet začíná stanovením počátečního měsíce, ten se stanoví jako první měsíc v roce, ve kterém se předpokládá nějaká kondenzace. Počáteční měsíc stanovíme výpočtem teploty, částečným tlakem nasycené vodní páry a rozložením vodní páry napříč konstrukcí a určíme, zda se může vyskytnout kondenzace. Výpočet opakujeme pro postupně za sebou jdoucí měsíce, dokud nenalezneme měsíc, ve kterém nastane kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce.

### 5.2.3 Rozdělení stavební konstrukce, tepelný odpor, ekvivalentní difúzní tloušťka

Stavební konstrukci, kterou posuzujeme, rozdělíme na soustavu rovnoběžných vrstev a rozhraní mezi nimi. Každá vrstva má své fyzikální vlastnosti a povrchové součinitele. Dalším krokem výpočtu je stanovení tepelného odporu  $R$  a ekvivalentní difúzní tloušťky  $s_d$  pro každou vrstvu. Nyní můžeme vypočítat součtový tepelný odpor a ekvivalentní difúzní tloušťku od vnějšího prostředí ke každému rozhraní  $n$  podle vztahu:

$$R'_n = R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j \quad (33)$$

$$s'_{d,n} = \sum_{j=1}^n s_{d,j} \quad (34)$$

Vztah pro odpor při prostupu tepla a celkovou ekvivalentní tloušťku je následující:

$$R'_T = R_{si} + \sum_{j=1}^N R_j + R_{se} \quad (35)$$

$$s'_{d,T} = \sum_{j=1}^N s_{d,j} \quad (36)$$

kde  $R_{se}$  je odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ];

$R_j$  tepelný odpor j-té vrstvy konstrukce [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ];

$R_{si}$  odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ];

$s_{d,j}$  ekvivalentní difúzní tloušťka j-té vrstvy konstrukce [m].

#### 5.2.4 Rozložení teploty a částečného tlaku nasycené vodní páry

Pro výpočet kondenzace je nutné znát rozložení teplot a částečného tlaku nasycené vodní páry. Pro tyto údaje nám poslouží následující výpočtové vztahy. Pro teplotu na jednotlivých rozhraních mezi materiály platí:

$$\theta_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T} \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (37)$$

kde  $R'_n$  je tepelný odpor na n-tém rozhraní [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ];

$R'_T$  celkový tepelný odpor konstrukce [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ];

$\theta_i$  návrhová vnitřní teplota v zimním období [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$\theta_e$  návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Pokud známe teplotu, použijeme empirický vzorec a dopočítáme částečný tlak nasycené vodní páry:

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}\right)} \quad \text{pro } \theta \geq 0^{\circ}\text{C} \quad (38)$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\left(\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}\right)} \quad \text{pro } \theta < 0^{\circ}\text{C} \quad (39)$$

V grafu na x-ovou souřadnici budeme vynášet tloušťku každé vrstvy odpovídající difúzní tloušťce  $s_d$  a na každé rozhraní vrstev ve směru y-nové souřadnice vyneseme hodnotu částečného tlaku nasycené vodní páry. Do stejného obrázku se vykreslí i průběh částečného tlaku vodní páry jako přímka mezi interiérem a exteriérem. Pokud tato přímka nepřesáhne na žádném rozhraní spojnici částečných tlaků nasycených vodních par, můžeme říct, že kondenzace v konstrukci nenastává.

Pokud přímka částečného tlaku vodní páry překročí spojnici částečného tlaku nasycené vodní páry na jakémkoliv rozhraní je nutné příčný řez překreslit tak, aby se jednotlivé přímky dotýkaly a vznikly na rozhraních tzv. body kondenzačního rozhraní.

### 5.2.5 Výpočet zkondenzovaného množství

Zkondenzované množství vodní páry je rozdíl mezi množstvím přicházející vlhkosti a odcházející vlhkosti vzhledem ke kondenzačnímu rozhraní. Výpočet zkondenzovaného množství vodní páry je závislý na počtu kondenzačních rozhraní. Pokud jsme z předcházejících kroků stanovili pouze jedno kondenzační rozhraní, použijeme k výpočtu tento vztah:

$$g_c = \delta_a \cdot \left( \frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \quad (40)$$

Ve stavebních konstrukcích s více než jedním kondenzačním rozhraním provádíme výpočet jednotlivě pro každé rozhraní.

Pro případ dvou kondenzačních rozhraní se použijí vztahy:

$$g_{c1} = \delta_a \cdot \left( \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \quad (41)$$

$$g_{c2} = \delta_a \cdot \left( \frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \quad (42)$$

kde  $\delta_a$  je součinitel difúzní vodivosti vzduchu [ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ];

$p_i$  částečný tlak vodní páry vnitřního vzduchu [Pa];

- $p_e$  částečný tlak vodní páry venkovního vzduchu [Pa];
- $p_c, p_{c1}$  částečný tlak vodní páry při kondenzaci resp. při kondenzaci na určitém rozhraní [Pa];
- $s_{d,c}$  ekvivalentní difúzní tloušťka konstrukce do rozhraní kondenzace [m];
- $s_{d,T}$  ekvivalentní difúzní tloušťka celé konstrukce [m].

### 5.2.6 Vypařování

Pro stanovení roční vlhkostní bilance je nutné vypočítat i množství vypařené vodní páry. Postup je zde obdobný jako u výpočtu zkondenzovaného množství vodní páry. Vypařené množství vodní páry vypočítáme jako:

$$g_{ev} = \delta_a \cdot \left( \frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \quad (43)$$

Pro dvě vypařovací rozhraní se množství stanoví podle vztahů:

$$g_{ev1} = \delta_a \cdot \left( \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \quad (44)$$

$$g_{ev2} = \delta_a \cdot \left( \frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \quad (45)$$

Pokud by při výpočtu došlo k akumulaci množství kondenzátu na rozhraní vrstev na konci měsíce do záporných hodnot, pak se položí rovno nule.

### 5.2.7 Posouzení konstrukcí

Podle výpočtové metody uvedené v normě [19] pro výpočet kondenzace uvnitř konstrukce mohou nastat tři vyhodnocení.

a) U konstrukce se nepředpokládá žádná kondenzace na žádném rozhraní v žádném měsíci, výpočet tento předpoklad potvrdí. V tomto ideálním případě ji označíme jako konstrukci bez vnitřní kondenzace.

b) Předpokládáme kondenzaci na jednom nebo více rozhraních, ale pro dotčené rozhraní se předpokládá vypaření kondenzátu během letních

měsíců. Zde je nutné uvést nejvyšší dosažené množství v určitém měsíci a celkovou roční bilanci zkondenzovaného a vypařeného množství vodní páry. Musí být uvažováno s postupnou degradací stavebních materiálů a zhoršení tepelně izolačních vlastností konstrukce.

c) Předpokládáme kondenzaci na jednom nebo více rozhraních a její neúplné vypaření během letních měsíců. Zde je konstrukce nevyhovující, uvedeme maximální množství kondenzátu, které se v konstrukci vyskytuje na každém rozhraní a množství zbytkového kondenzátu po vypaření části vlhkosti po 12 měsících na každém rozhraní [19].

### **Příklad pro porovnání norem**

V příloze A je proveden výpočet kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce ploché střechy podle normy [18] a poté podle normy [19]. Okrajové podmínky jsou zvoleny v obou případech stejně, abychom mohli porovnat výsledky.

## **5.3 Numerické metody**

Pro výpočet kondenzace vodní páry lze jednotlivé konstrukce a okrajové podmínky vymodelovat ve výpočetních programech. Například můžeme využít tyto programy:

- WUFI Pro – software pro modelování jednorozměrného šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a materiálech. Výpočet je založen na použití diferenciálních rovnic.
- CalA – software pro numerické 2D simulace fyzikálních jevů
- Delphi – grafické vývojové prostředí určené pro tvorbu aplikací v MS Windows v jazyce Pascal

### **5.3.1 WUFI Pro**

Software modelující jednorozměrné šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a materiálech. Vyhodnocuje rizika spojená s nadměrnou akumulací vlhkosti, kondenzací vodní páry nebo růstem plísní na površích konstrukcí.

Výpočet používá diferenciálních rovnic a tím zahrnuje do modelování jevy, jako jsou orientace vůči světovým stranám, vliv barvy vnějšího povrchu konstrukce na šíření tepla, akumulace tepla v konstrukci a mnohé další. Software je mezinárodní a díky tomu využívá databázi vnějších a vnitřních okrajových podmínek naměřených po celém světě. Další databází v programu je databáze materiálů, která je rovněž velmi obsáhlá. Nachází se v ní přes 600 stavebních materiálů naměřených ve výzkumných ústavech po celém světě. Do jednotlivých databází je možné přidávat své vlastní okrajové podmínky i materiály.

Modelování v programu je nestacionární dle nastaveného kroku. Program běžně modeluje jevy vyskytující se ve stavebních konstrukcích a materiálech, jako jsou:

- riziko kondenzace na vnitřním povrchu,
- riziko růstu plísní,
- vliv větrem hnaného deště na chování obvodové konstrukce,
- riziko kondenzace a akumulace vodní páry uvnitř stavební konstrukce,
- chování konstrukce při zatékání dešťové vody,
- porovnání odlišných skladeb při rekonstrukci stávající konstrukce.

Software WUFI Pro splňuje požadavky normy ČSN EN 15026 na simulační software, který umožňuje dynamické simulace šíření vlhkosti a tepla ve stavebních konstrukcích [26].

### 5.3.2 CalA

Název CalA je zkratkou slov Calculation Area, autory tohoto softwaru jsou Ondřej Šikula a Josef Plášek ze Stavební fakulty v Brně. Tento software je založen na numerickém řešení diferenciální rovnice, které popisuje transport obecné veličiny  $W$  s koeficienty  $c$  pomocí metody kontrolních objemů. Program lze využít při výzkumech i v praxi ve stavebnictví, zejména při úlohách vedení tepla 2D, ale také při transportu vlhkosti, potenciálního izoentropického proudění nebo rychlostního pole při laminárním proudění tekutiny v potrubí.

Práce v programu nám umožňuje vytvoření libovolné geometrie, výpočetní sítě a definice okrajových podmínek, které jsou vstupem pro výpočet. Program dále

nabízí grafický výstup v podobě obrázků, grafů nebo číselných výstupů včetně automatizovaného zpracování výsledků časově neustálených dějů.

Výhodou programu je jednoduchá a rychlá tvorba, schopnost simulace i rozsáhlých úloh o více než dvaceti milionech výpočetních buněk, v neposlední řadě možnost importu geometrie konstrukcí ze softwarů CAD a jim podobných [27].

### **5.3.3 Delphi**

Tento software používá programování na základě komponentů, to znamená na balíčku funkcí, které vykonává určitou činnost – vytváří text, tabulky, obrázky, přehrává multimédia apod.

Velkou výhodou oproti konkurenčním výrobkům jsou právě tyto balíčky, které jsou součástí softwaru. Další balíčky funkcí si lze stáhnout zdarma nebo zakoupit na internetu nebo vytvořit své vlastní. Software Delphi existuje v různých verzích s rozdílnými znaky, jedním příkladem tohoto programu je Embarcadero Delphi 2010, ve kterém byl vytvořen program Teplo 2014 [28].

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 6.1 Úvod

Na trhu se nevyskytuje průmyslově vyráběný snímač, který by dokázal monitorovat vznik a průběh kapalně vody (kondenzace) ve stavebních konstrukcích. Experimentální část je zaměřena na vývoj vlastního senzoru. Použití senzoru je zamýšleno pouze do konstrukcí, kde se předpokládá kondenzace v jedné rovině, na rozhraní dvou materiálů s výrazně odlišným difúzním odporem.

Předpokládané používání senzorů je u konstrukcí plochých jednoplášťových střech s povlakovou hydroizolační vrstvou s vysokým difúzním odporem.

K měření byly použity vhodné elektrické veličiny. Senzor pracuje na principu měření změny elektrických veličin v závislosti na změně vlhkosti známého a kalibrovaného materiálu.

### 6.2 Cíle

Cíle experimentální části jsou:

- Vývoj snímače pro detekci a kvantifikaci rovinné kondenzace na rozhraní dvou vrstev.
- Testování v klimatické komoře pro ověření funkčnosti a citlivosti snímače při vystavení určitým teplotám a relativním vlhkostem vzduchu mimo oblast kondenzace.
- Kalibrace snímače v klimatické komoře mimo oblast kondenzace.
- Vývoj metody pro ověření funkčnosti a kalibrace senzoru i v oblasti kondenzace

### 6.3 Seznam používaných měřících zařízení

- COMETER D3631 – digitální záznamový teploměr a vlhkoměr;
- klimatizovaná komora Vötsch Industrietechnik s deklarovanou teplotou vzduchu 10-95 °C a deklarovanou relativní vlhkostí vzduchu 10-95 %;



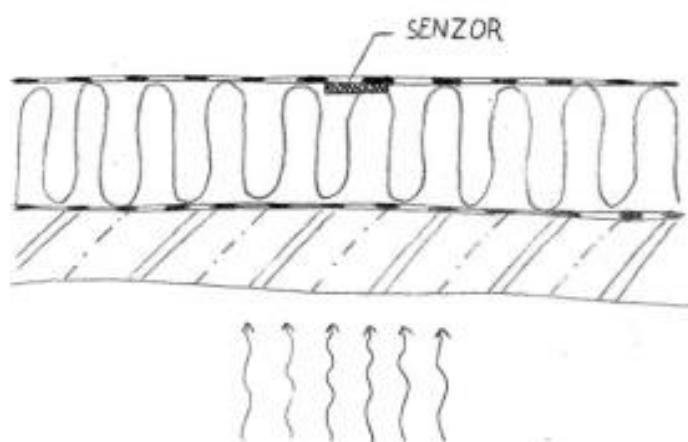
- LCR HiTESTER 3532 HIOKI – zařízení pro měření široké škály aplikací, především pro testování elektronických součástek. Zde byl využit pro měření elektrické impedance a fáze;
- školní stabilizovaný zdroj TESLA BK 127;
- Hewlet packard 53131 A, universal counter – univerzální čítač frekvence pro rychlé zpracování signálu;
- Hmotnostní váha, výrobce METTLER, typ college.

Podrobně jsou měřicí zařízení popsány v příloze B.

## 6.4 Vývoj senzorů

### 6.4.1 Základní předpoklad chování senzorů

Za předpokladu kondenzace vodní páry v jedné rovině bude senzor vložen právě do rozhraní dvou vrstev materiálů s výrazně odlišným difúzním odporem. Při podmínkách, kdy dochází ke kondenzaci, tedy dojde k difúzi vodní páry propustným materiálem a následně na materiálu s vysokým difúzním odporem, který má zároveň nízkou teplotu (dosahuje teploty rosného bodu) dojde ke kondenzaci vodní páry. Zde se nachází vyrobený senzor zapojený do elektrického obvodu, který vznik a množství zkondenzované vodní páry vyhodnocuje (obrázek 15).



Obr. 15 Umístění senzoru v jednoplášťové ploché střeše

### 6.4.2 Materiály pro výrobu senzorů

Vzhledem ke známým metodám měření, vzdušné vlhkosti i vlhkosti v materiálech, byly zvoleny jako měřicí metody odporová a kapacitní. Bylo nutné najít takové materiály, které budou vhodné pro sestavení jednotlivých senzorů. Hlavním kritériem pro výběr materiálu je změna elektrických vlastností po absorpci zkondenzované vodní páry.

#### Sádra

Jedním ze dvou materiálů byla použita sádra. Při jejím výběru byly zohledněny druhy a vlastnosti vyráběných sáder, které jsou uvedeny v příloze C.

#### *Výběr sádry*

Pro výrobu senzorů byla použita stavební bílá  $\beta$  sádra (obr. 16). Jakost vyráběné sádry je sledována podnikovou laboratoří pod stálým dohledem autorizované osoby z firmy GYPSTREND, s.r.o. Kobeřice.



Obr. 16 Stavební bílá  $\beta$  sádra, použita pro výrobu senzorů [30]

Tato sádra dle zařazení je normálně tuhnoucí, normálně mletá a má pevnost v tlaku 2 MPa. Pokud bude při přípravě sádrové kaše použito více záměsové vody, vznikne více pórů a tím bude docíleno větší nasákavosti samotných senzorů.

### **Polyuretanová pěna Askina Foam**

Pro výrobu jednoho z kapacitních senzorů byla použita polyuretanová pěna Askina Foam od německého výrobce Braun. Jedná se o dvouvrstvý pěnový obvaz, který je vyroben pro použití ve zdravotnictví. Její největší výhodou je vysoká absorpční kapacita. Samotný obvaz se skládá z vrstvy měkké polyuretanové pěny, která je prodyšná a vysoce nasákavá a tenké polyuretanové fólie, která je prostupná pro vodu a nepropustná pro bakterie [29].



Obr. 17 Polyuretanová pěna Askina Foam [29]

### **Materiály pro elektrické zapojení**

Jako vodiče byly u odporového senzoru použity měděné dráty o průměru 1 mm, ke kterým se připájely izolované vodiče, které jsou běžně používány. Kapacitní senzory jsou vyrobeny z nerezového tahokovu typu SQ/6, který ve vnější části konstrukce plní funkci uzemnění a ve vnitřní části konstrukce plní funkci vodiče. V této střední části jsou na tahokov napojeny izolované vodiče, které vedou ke zdroji napětí.

#### **6.4.3 Popis navržených senzorů**

Celkem byly vyrobeny čtyři druhy senzorů:

- odporové čtyřvodičové snímače čtvercového tvaru

- odporové kulaté dvouvodičové snímače
- kapacitní kulaté snímače
- kapacitní pěnové snímače čtvercového tvaru.

### **Odporové čtyřvodičové snímače čtvercového tvaru**

Ohraničující konstrukce je čtvercového tvaru o délce strany 40 mm, vyrobená z desky pro plošné spoje a má výšku 3 mm. Tato deska zabraňuje difúzi vodní páry ze stran do hotového snímače. Do dvou protilehlých stran této konstrukce jsou provrtány čtyři otvory pro měděné vodiče, které jsou ke konstrukci upevněny pomocí pájení (viz obr. 18).

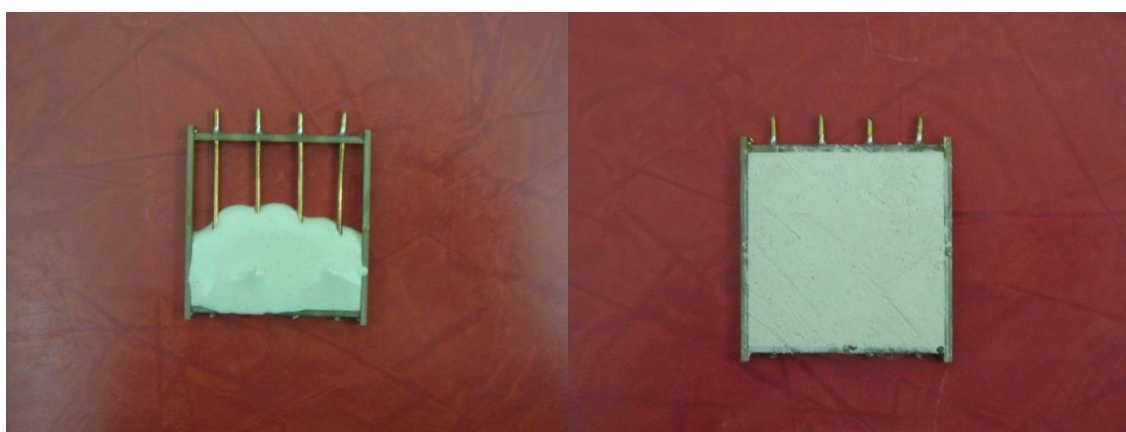


Obr. 18 Konstrukce odporového čtyřvodičového snímače

Dalším krokem bylo pomocí zakoupené sádry, jejího přesného odváženého množství, destilované vody a pomůcek umíchat sádrovou kaši (obr. 19). Množství sypké sádry a vody bylo přepočítáno podle návodu od výrobce na obalu zakoupené sádry. Sádrová kaše byla postupně nanášena pomocí plastové lžičky mezi jednotlivé měděné vodiče (obr. 20).



Obr. 19 Pomůcky pro výrobu sádrové kaše a vyrobená sádrová kaše



Obr. 20 Nanášení sádry mezi měděné vodiče, snímač po stržení přebytečného množství sádry

Po 24 hodinách byla sádra dostatečně pevná. Po zatvrdnutí sádry bylo nutné pomocí brusného papíru snímač zbrousit, tím docílíme lepší rovinnosti a díky plastové ohraničující konstrukci máme také docíleno konstantní tloušťky celého snímače 3 mm. Celkem bylo vyrobeno šest kusů těchto snímačů.

### **Odporové kulaté dvouvodičové snímače**

U těchto snímačů je postup velice podobný. Ohraničující konstrukci snímačů tvoří polypropylenový kroužek o výšce 2 nebo 3 mm. Do středu kroužku bylo

umístěno zakoupené vlhkostní čidlo typu MULTICOMP HCZ-D5-A (obr. 21). Vodiče, vycházející ze zakoupeného čidla, byly nadstaveny izolovanými dráty, které byly k zakoupenému senzoru připájeny a poté provlečeny plastovým kroužkem, ve kterém byly předvrtány dva otvory.



Obr. 21 Vlhkostní čidlo MULTICOMP HCZ-D5-A [31]

Polypropylénový kroužek s umístěným senzorem byl poté zasádrován stejným postupem jako v předchozím případě. Povrchovou úpravu proti chybnému zkratování a ochraně proti vodě ze sádrové kaše tvoří silikonový lak na spoji vodič – deska vlhkostního snímače. Vlhkostních čidel MULTICOMP HCZ-D5-A byly celkem vyrobeny tři kusy, dvě byly o výšce 3 mm a jeden senzor o výšce 2 mm.

### **Kapacitní kulaté snímače**

Postup výroby těchto senzorů je totožný s postupem u odporových kulatých dvouvodičových senzorů. Kapacitní kulaté snímače byly taktéž umístěny v polypropylénových kroužcích o výšce 3 mm a byly vyrobeny ve dvou kusech. Pouze do středu kolečka bylo umístěno místo odporového snímače kapacitní polymerové čidlo vlhkosti KFS33-LC (obrázek 4).

Vodiče samotného polymerového čidla byly opět opatřeny silikonovým lakem proti zkratování, nadstavené vodiče byly vyvedeny převrtanými otvory skrz plastovou obrubu kolečka a čidlo bylo zasádrováno. Po zatuhnutí sádry byl senzor zbroušen na brusném papíru, aby bylo docíleno tloušťky senzoru 3 mm.



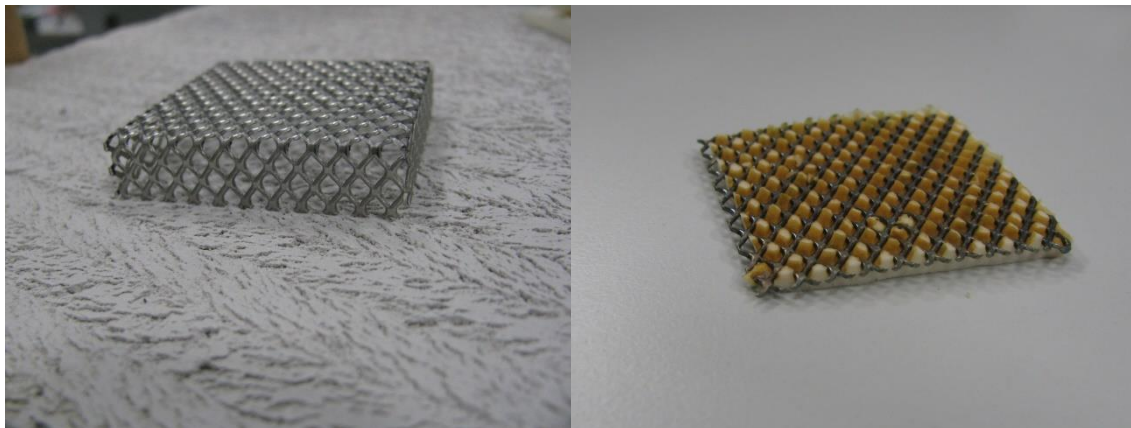
Za kapacitním snímačem byla osazena ještě jedna součástka – převodník. Převodník byl vyroben na destičce plošného spoje a slouží k převodu kapacity na frekvenci.

### Kapacitní pěnové snímače čtvercového tvaru

Posledním typem snímačů jsou kapacitní, vyrobeny z polyuretanové pěny Askiny Foam a tahokovu – typu SQ/6.

V prvním kroku byla vyrobena konstrukce z tahokovu. Tahokov má velikost oka 6x4,5 mm, tloušťka drátu byla použita 0,8 mm. Materiál tahokovu je nerez a výrobek byl válcovaný. Konstrukce pro snímač, která byla vyrobena, připomíná krabičku o rozměrech 50x50x10 mm. V jednom rohu konstrukce byla část materiálu odstraněna z důvodu vyvedení vodičů. Tato krabička sloužila jako uzemnění.

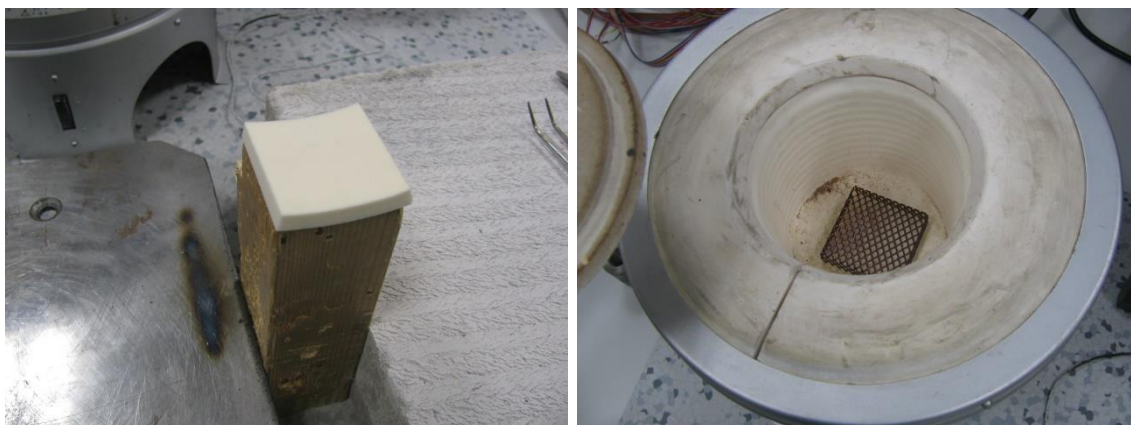
Další součástí senzoru, který byl z tahokovu vyroben, je střední kus o rozměrech 45x45 mm, ten sloužil jako vodič. Poslední součástí je horní část vyrobená z tahokovu o rozměrech 50x50 mm, která sloužila také jako uzemnění. Tahokov tedy posloužil jako konstrukce, vodič a uzemnění zároveň.



Obr. 22 Vlevo – konstrukce z tahokovu o rozměrech 50x50x10 mm, vpravo – horní část konstrukce 50x50 mm s již natavenou pěnou Askinou Foam

Ke konstrukci z tahokovu bylo zapotřebí připevnit materiál, který bude absorbovat zkondenzovanou vlhkost. Byla vybrána polyuretanová pěna Askina Foam a k tahokovu byla připevněna natavením. Z pěny byly nařezány čtverce o rozměrech 50x50 mm. Jedno kapacitní pěnové čidlo bylo tvořeno dvěma vrstvami polyuretanové pěny.

Postup natavení tahokovu na polyuretanovou pěnu byl následující. Pěna byla osazena na dřevěný špalík (obr. 23). Konstrukce z tahokovu, připomínající krabičku, byla nahřata v keramické peci na 1000 °C (obr. 23) a poté pomocí ocelových kleští přiložena na polyuretanovou pěnu (obr. 24). Po vychladnutí se spodní konstrukce snímače otočila a do keramické pece se vložil střední kus. Na protilehlou stranu pěny se natavil nahřátý střední kus, tedy tahokov o rozměrech 45x45 mm (obr. 25).



Obr. 23 Vlevo – osazení polyuretanové pěny na dřevěný špalík, vpravo – nahřátí konstrukce z tahokovu v keramické peci na 1000 °C



Obr. 24 Vlevo – natavení tahokovu na polyuretanovou pěnu pomocí ocelových kleští, vpravo – spodní část snímače





Obr. 25 Protilehlá strana pěny s nataveným středním kusem tahokovu o rozměrech 45x45 mm

V této fázi je hotová spodní část snímače. Na dřevěný špalík byla osazena druhá vrstva polyuretanové pěny, do keramické pece byla vložena horní část z tahokovu o rozměrech 50x50 mm, kterou nahřejeme na 1000 °C. Postup se opakuje, po nahřátí tahokov opět pomocí ocelových kleští osadíme na pěnu. Tímto vznikne horní část snímače.

U spodní i horní části snímačů vzniklo při natavování protavení tahokovu tak, že pěna vystupuje několik milimetrů nad tahokov. Pomocí malých ostrých nůžek zarovnáme pěnu rovnoměrně s tahokovem (obrázek 26).



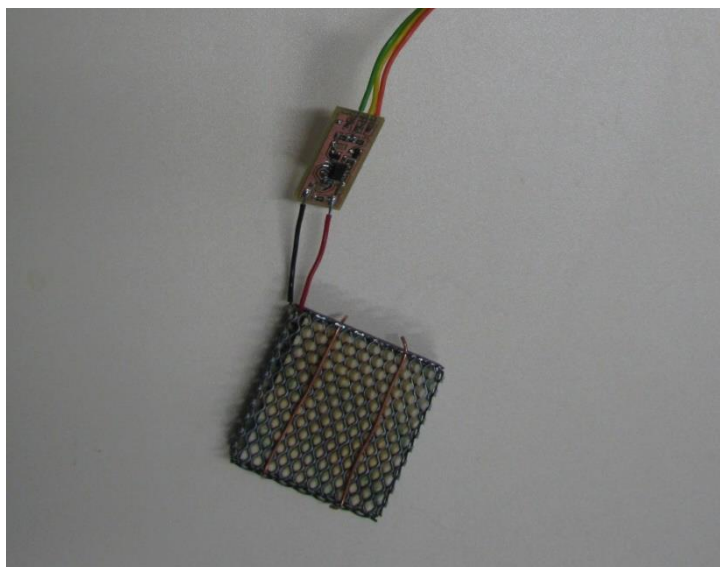
Obr. 26 Zarovnání pěny s tahokovem

Při nahřívání v keramické peci na 1000 °C vznikla na povrchu tahokovu oxidace modré barvy. Tato oxidace musela být odstraněna v místech, kde bylo nutné

provést napojení vodičů pomocí pájení. Odstranění oxidace bylo provedeno jemným pilníkem.

Posledním krokem je spojení obou částí snímačů. Po napájení vodičů na příslušná místa byla horní část snímače nasazena na spodní část snímače. Zabezpečení proti případnému posunutí nebo vypadnutí horní části konstrukce bylo pomocí dvou měděných drátků, které byly provlečeny otvory v tahokovu a poté ohnuty o 90°.

I za tímto kapacitním snímačem je osazen převodník z kapacity na frekvenci, který byl opatřen silikonovým nátěrem proti zkratování. Hotový kapacitní pěnový snímač čtvercového tvaru je na obrázku 27.



Obr. 27 Snímač s napájecími vodiči, s měděnými drátky a převodníkem

## 6.5 Metodika pro ověření funkčnosti a kalibraci senzorů

Při ustálených a definovatelných podmínkách bylo vhodné vyzkoušet sorpční vlhkost vyrobených snímačů. To znamená, do každého čidla dát určité množství vody a zjistit změnu odpovídající elektrické veličiny. Nejprve bylo aplikováno množství vody pomocí injekční stříkačky, tento postup byl ale zdlouhavý a nepřesný. Klimatická komora neumožňuje vytvoření prostředí tak, aby v čidle spolehlivě kondenzovala voda. Proto bylo nutné doplnit měření o další experiment na modelu konstrukce, kde bylo možné čidlo osadit do plochy, kde dochází ke kondenzaci.

Testování senzorů probíhalo na půdě Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, kde byla využita klimatická komora. Vyrobené senzory byly zapojeny do elektrického obvodu a uloženy v komoře, kde byly vystaveny ustáleným podmínkám. Podmínky byly po určité době měněny a to buď změnou teploty vzduchu, nebo častěji změnou vlhkosti vzduchu.

Takovéto testování bylo provedeno dvakrát. První měření probíhalo dva dny, snímače byly testovány při teplotách 30 °C až -20 °C vždy po krocích 10 °C. Vlhkost vzduchu byla upravována ze 40 % na 95 % po krocích 20 %. Při nižších teplotách, cca od 0 °C však klimakomora Vötsch Industrietechnik nedokáže vlhkost vzduchu regulovat.

Druhé měření probíhalo také dva dny. Při něm byly proměřeny teploty 30 °C, 20 °C a 10 °C, vlhkost vzduchu se měnila pouze po krocích 10 % a to v rozmezí 40 % až 95 % při každé teplotě.

## **6.6 Metodika pro nedestruktivní stanovení kondenzace v modelu konstrukce**

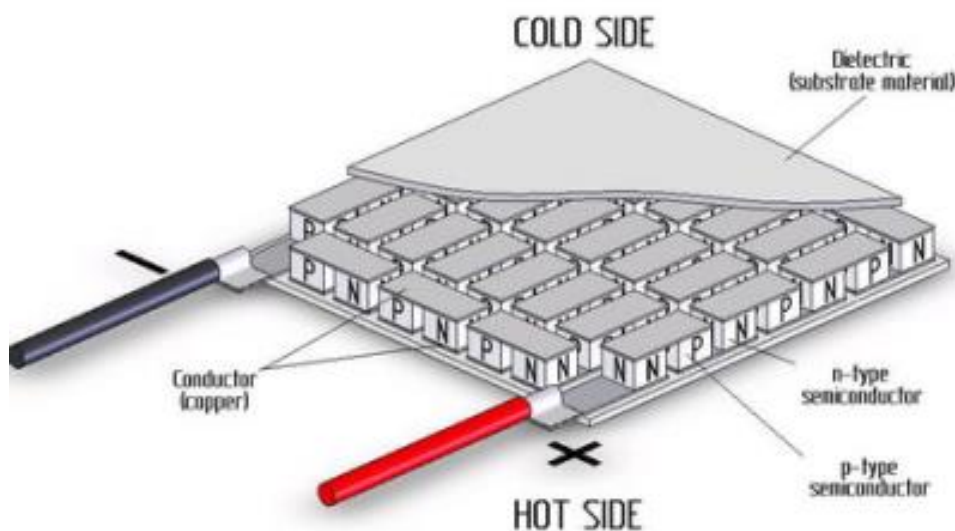
Další experiment spočívá v měření senzorů ve zmenšeném a upraveném modelu konstrukce jednoplášťové ploché střechy.

Hlavní část modelu je vyrobena z pěnového polystyrénu a slouží k upevnění čtyř vyjímatelných čtverců o velikosti 200x200 mm. Tyto čtverce simulují část souvrství jednoplášťové ploché střechy. Skládají se ze skelné plsti tloušťky 20 mm, geotextilie o plošné hmotnosti 500 g/m<sup>2</sup> a hydroizolační fólie DEKPLAN 76.

Aby bylo docíleno difúze vodní páry pouze jedním směrem a zamezeno difúzi vodní páry z boku do modelu konstrukce, vyjímatelné čtverce byly pečlivě oblepeny hliníkovou lepicí páskou. Fotodokumentace výroby celého modelu konstrukce je v příloze E.

Měření probíhalo opět na půdě Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií v laboratorních podmínkách. Docílení kondenzace na spodním líci hydroizolační fólie bylo tedy nutné zajistit pomocí techniky, proto byly sestaveny čtyři chladicí aparatury. Chladicí aparaturu navrhnul a sestavil na základě

našeho zadání v rámci své bakalářské práce Tomáš Voda z Ústavu automatizace a měřicí techniky. Aparatura se skládá ze čtyř hliníkových desek tloušťky 5 mm, na které se osadily Peltierovy články (obr. 28). Tyto články fungují na stejnojmenném Peltierově jevu. Tento jev říká, že pokud proud prochází obvodem se dvěma rozdílnými vodiči zapojenými v sériovém zapojení, jedna plocha článku se ochlazuje a ta druhá se zahřívá. Ochlazovaná plocha Peltierova článku byla využita jako simulace teplotních podmínek v exteriéru. Teplota povlakové hydroizolace se snížila pod hranici rosného bodu a nastaly podmínky pro vznik kondenzace. Spodní líc hliníkové desky sloužil pro ochlazování povlakové hydroizolace, horní líc bylo nutné alespoň částečně izolovat od interiérového prostředí. Jako izolace je použita reflexní fólie Sunflex Floor a to ve dvou vrstvách, pro připevnění k hliníkové desce byla použita hliníková lepicí páska. Zahřívaná plocha Peltierova článku musí být ochlazována, a proto je na ní umístěn chladič s větrákem.



Obr. 28 Peltierův článek [39]

Do zkušebních čtverců jsou umístěny senzory pro ověření funkčnosti a kalibraci i v oblasti kondenzace. Senzory jsou přesněji umístěny v rovině geotextilie, tedy přímo pod fóliovou hydroizolací. Vzhledem k omezenému počtu míst, byly vybrány tři senzory podle jejich funkčnosti v klimatické komoře. Jsou jimi obě kulatá kapacitní čidla a nejtenčí odporové kulaté dvou vodičové čidlo. V posledním čtvrtém vzorku není umístěn žádný senzor. Tento vzorek

je vyhodnocován hmotnostní metodou. Celý vzorek je po časových úsecích vždy převážen na hmotnostní váze METTLER.

Laboratorní podmínky, ve kterých bylo měření prováděno, poskytovaly teplotu cca 20 až 23 °C a nízkou relativní vlhkost 30 %. V laboratoři byla v době měření vlhkost uměle zvyšována k hodnotě 40 %. Bylo tím docíleno zvýšení teploty rosného bodu k osmi až devíti stupňům Celsia. Pokud by relativní vlhkost zůstala pouze na hodnotě 30 %, teplota rosného bodu by byla cca 4 °C. Pokud bychom při měření chtěli klesnout pod teplotu rosného bodu, mohlo by docházet k zamrznání kondenzátu a to jsme nechtěli připustit.

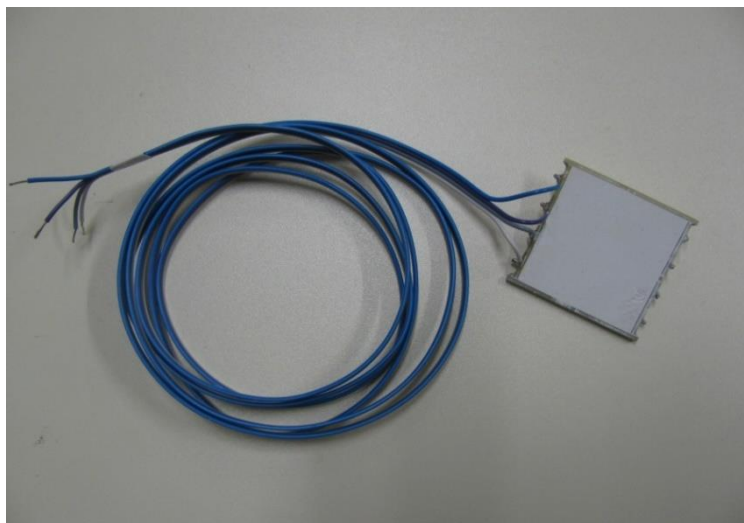
## 6.7 Výsledky měření

### 6.7.1 Výsledky pro ověření funkčnosti a kalibraci senzorů

Měření senzorů v klimakomóře hodnotilo reakci elektrických veličin na změnu relativní vlhkosti při určité teplotě. Tato změna měla odpovídat alespoň klesající nebo stoupající tendenci zatěžování.

#### Odporové čtyřvodičové snímače čtvercového tvaru

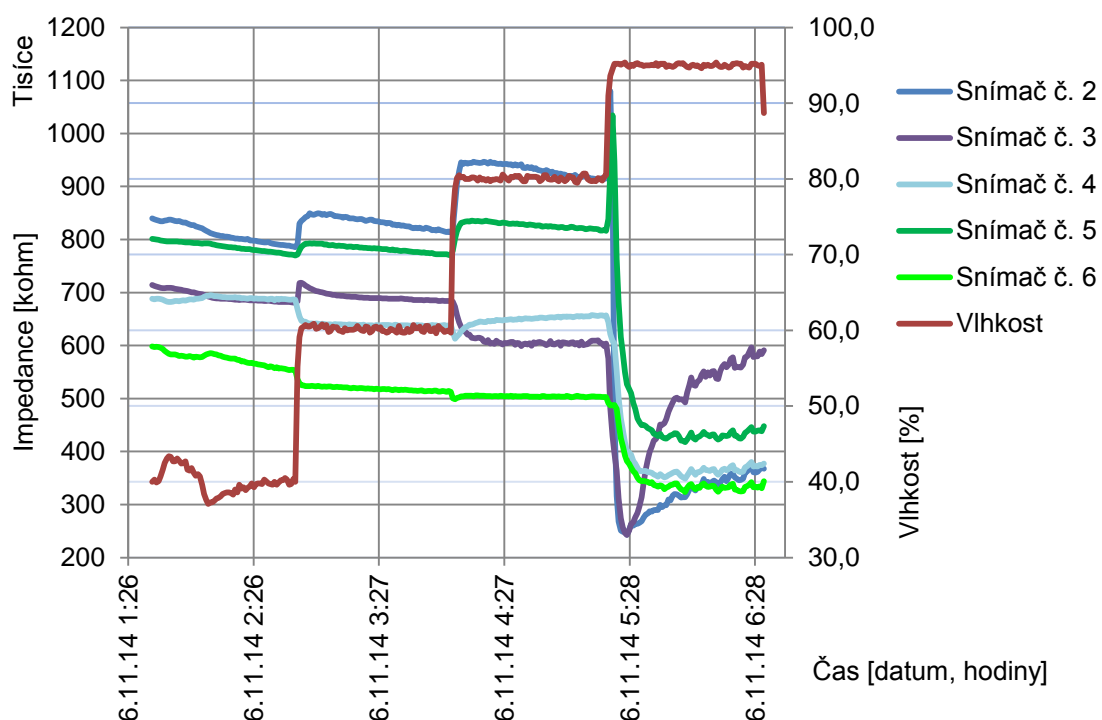
Na obrázku 29 vidíme vyrobený snímač, ke kterému jsou připájeny izolované vodiče pro napojení na měřicí přístroje. Zapojení je provedeno tak, že vnitřní vodiče jsou napojeny na vyhodnocovací jednotku a prochází jimi napětí, vnější vodiče jsou napájecí (proudové). Odporové čtyřvodičové snímače čtvercového



Obr. 29 Odporový čtyřvodičový snímač čtvercového tvaru

tvary byly kompletně vyrobeny z výše zmíněných materiálů. Proto jsme jen očekávali hodnoty, které budou naměřeny. Hodnoty čtvercových odporových senzorů jsou v rozmezí 18 M $\Omega$  až 180 k $\Omega$ .

V grafu (obr. 30) vidíme průběh měření těchto snímačů při podmínkách, kdy se měnila hodnota relativní vlhkosti vzduchu od 40 % do 95 % při konstantní teplotě 30 °C. Průběh změny vlhkosti vzduchu je znázorněn červenohnědou křivkou. Modré a zelené křivky znázorňují průběh elektrické impedance senzorů č. 2 až 6 v čase a v závislosti na zmíněných podmínkách.



Obr. 30 Průběh elektrické impedance odporových sádrových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 30 °C

Obecně lze říci, že se zvyšující vlhkostí by se měla elektrická impedance snižovat. Toto chování lze pozorovat pouze u senzoru č. 6. Ostatní senzory vždy po změně vlhkostních podmínek reagují skokově zvýšením elektrické impedance a poté jejím postupným ustálením nebo nízkým klesáním.

Při poslední změně vlhkosti na 95% dochází k výrazným reakcím u všech senzorů. Senzorům č. 4 a 6 klesne impedance a po době přibližně 45 minut dojde k jejímu ustálení. Senzory č. 2 a 5 vykazují podobné chování, hodnoty impedancí prudce vystoupají nahoru ve velmi krátké době, poté se ustálí



na přibližně stejných hodnotách jako senzory č. 4 a 6. U senzoru č. 3 je zaznamenán propad hodnot elektrické impedance, který trvá přibližně 15 minut, poté i u něj dojde k ustálení. Grafické znázornění oblasti reakce senzorů na vysokou vlhkost (obr. D.1) a veškeré další grafy jsou uvedeny v příloze D.

Těchto senzorů bylo celkem vyrobeno šest kusů. Senzor č. 1 se choval při teplotě 30 °C obdobně jako ostatní, ale nabývá několikanásobných hodnot, proto je jeho graf znázorněn na samostatném obrázku D.2.

Po dosažení maximální možné vlhkosti v klimakomoře jsou změněny teplotní podmínky. Teplota je upravena z 30 °C na 20 °C. Vlhkost je opět skokově upravována po 20 %. Po vynesení grafu se však ukázalo, že úprava vlhkosti směrem dolů, od vyšších hodnot k nižším, není dobře regulovatelná. S klesající vlhkostí by se měla elektrická impedance zvyšovat, naznačení tohoto jevu (obr. D.3) můžeme pozorovat u senzorů č. 4, 6 a v některých úsecích senzorů č. 1, 3 a 5. Při snižování vlhkosti je možné, že se v senzorech objevuje hystereze. Tedy, že desorpční větev nebude vykazovat stejné hodnoty jako ta sorpční.

Při teplotě 10 °C jsou senzory měřeny opět při stoupající relativní vlhkosti ze 40 % na 95 % po dvaceti procentních krocích. Jak již bylo zmíněno, impedance by měla se vzrůstající vlhkostí klesat, to se při pohledu na data, znázorněná na grafu (obr.D.4) neděje vůbec nebo velmi zřídka.

Následně jsou v klimatické komoře měněny teplotní podmínky a to postupně na 0 °C, -10 °C a nakonec na -20 °C. U takto nízkých hodnot teploty vzduchu již není deklarovaná nastavitelnost vlhkosti, reakce změny elektrických vlastností snímačů jsou na obrázcích D.5, D.6 a D.7. Při teplotě 0 °C senzory nereagují na změnu vzdušné vlhkosti z hodnoty 85 % na hodnotu 50 %. Při teplotě -10 °C dochází v relativní vlhkosti vzduchu k výkyvům, na které senzory reagují změnou elektrické impedance ve stejném časovém úseku. Při teplotě -20 °C je chování senzorů velmi podobné jako při teplotě -10 °C.

Druhé testování je měřeno v teplotách, kde lze nastavit relativní vlhkost vzduchu. Při každé testované teplotě jsou nastaveny vlhkosti v rozmezí 40 až 95 % a postupuje se po desetiprocentních krocích. Při teplotě 30 °C

se s vlhkostí klesá, poté se při teplotě 20 °C stoupá a naposledy se při teplotě 10 °C s vlhkostí opět klesá. Grafické znázornění reakce senzorů je uvedeno v příloze D.

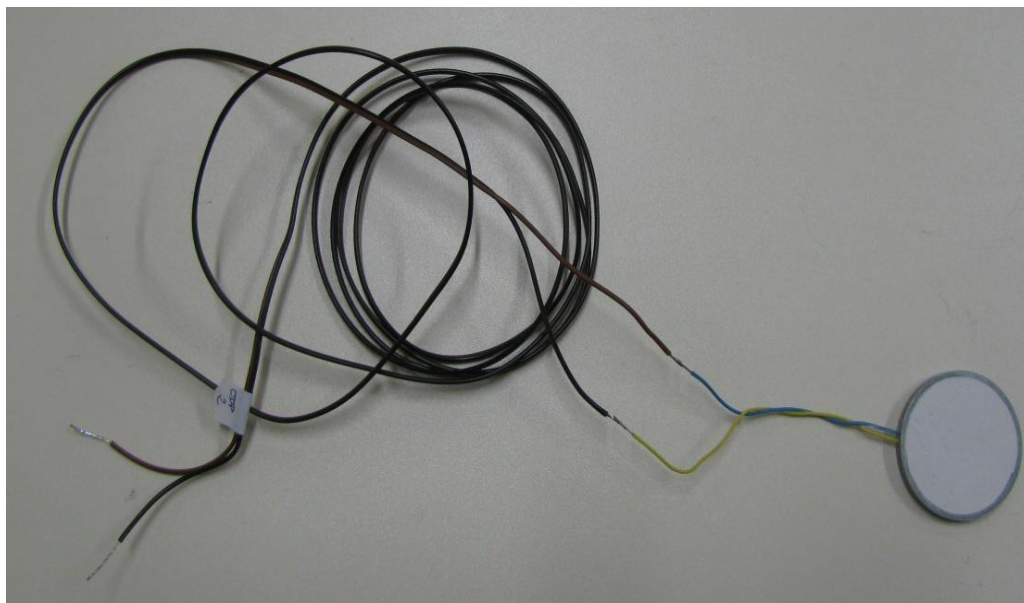
Doposud jsou všechny snímače měřeny stejnosměrným proudem. Při druhém měření je odebráno čidlo č. 1, které je napojeno na LCR HiTESTER a jako jediné je měřeno střídavým proudem. Závislost elektrické impedance při teplotách 30, 20 a 10 °C na již zmíněných vlhkostech jsou vykresleny v následujících grafech v příloze D, výsledky elektrické veličiny při průchodu střídavého elektrického proudu lze označit za kolísavé.

### **Odporové kulaté dvou vodičové snímače**

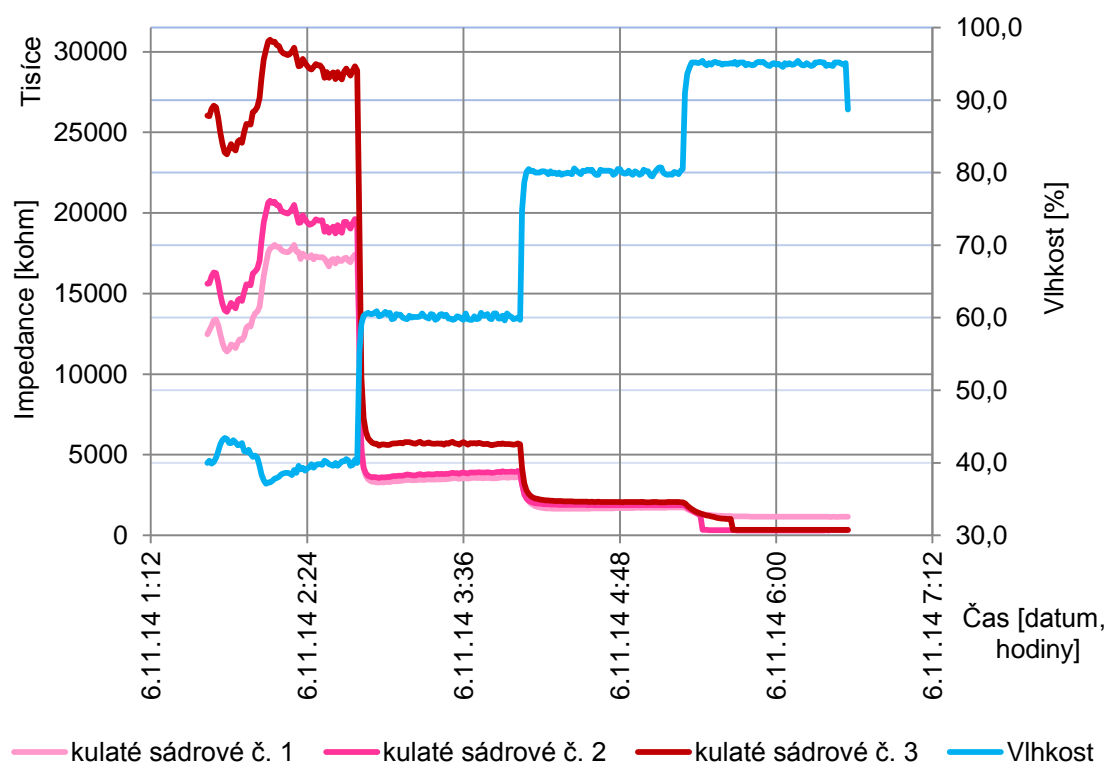
K odporovému čidlu, ve kterém je zasádrovaný zakoupený senzor, se také musejí připájet izolované vodiče pro napojení na měřicí přístroje (obr. 31). Při testování senzorů v klimatické komoře je pak důležité si uvědomit, že senzory č. 1 a 2 mají stejnou tloušťku 3 mm a třetí senzor č. 3 má tloušťku pouze 2 mm. Můžeme očekávat rychlejší reakci senzoru č. 3 a stejné nebo velmi podobné průběhy senzorů č. 1 a 2. Rozsah naměřených hodnot je 48,3 MΩ až 249 kΩ.

Na obrázku 32 je znázorněno první měření při teplotě 30 °C, kdy vlhkost stoupá od 40 % k 95 %. Tenčí senzor č. 3 vykazuje při nižších vlhkostech vyšší citlivost než zbylé dva senzory. Snímače č. 1 a 2 vykazují podobné chování, jako jsme očekávali. Další měření jsou seřazena chronologicky v příloze D.





Obr. 31 Odporový kulatý dvou vodičový snímač

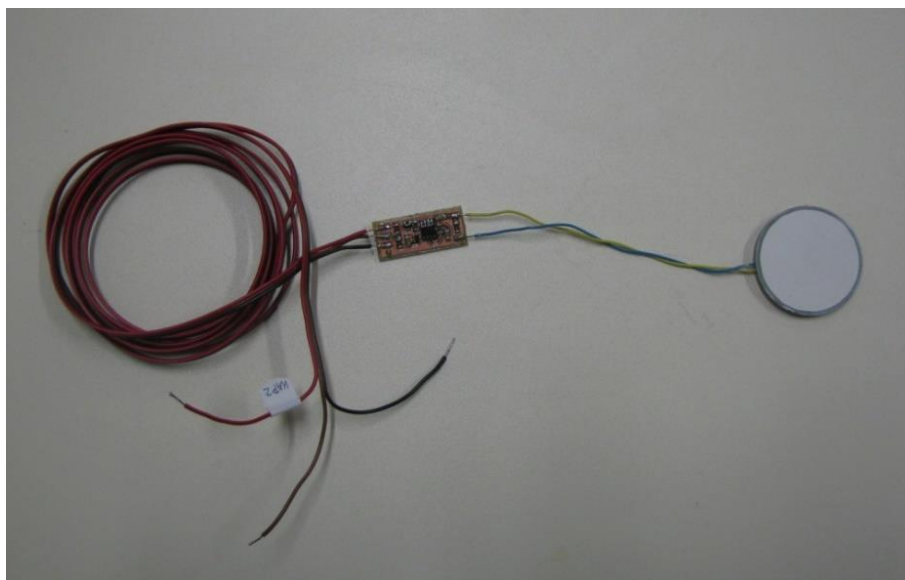


Obr. 32 Průběh elektrické impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě 30 °C

### Kapacitní kulaté snímače

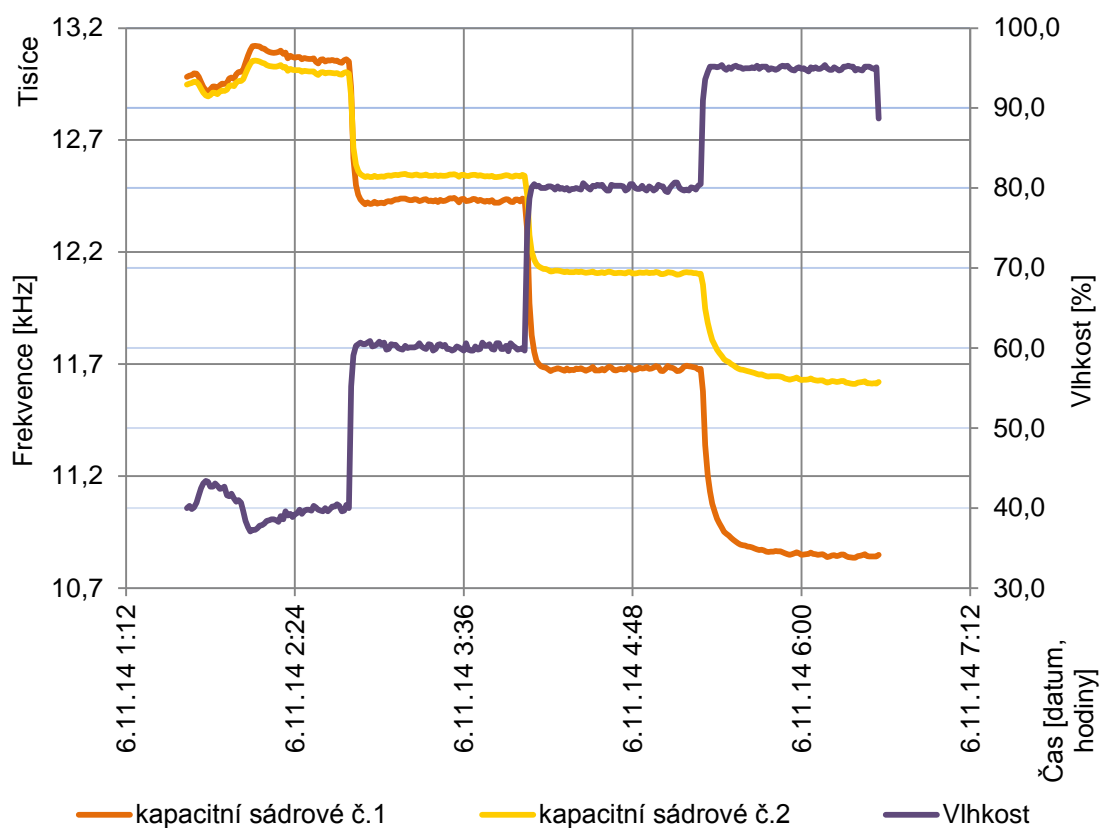
Dalším druhem senzorů, které byly v klimatické komoře testovány, jsou průmyslově vyráběné kapacitní senzory zalité do sádry. Tyto senzory jsou dva o tloušťce 3 mm, a které jsou opět nadstaveny izolovanými vodiči pro napojení k univerzálnímu čítači frekvence (obr. 33).

Vzhledem ke stejné tloušťce vyrobených senzorů je očekávána podobná citlivost senzorů v klimatické komoře při jednotlivých měření. Toto chování senzorů se potvrdilo. Křivky mají obdobný průběh. Kapacitní senzory prochází stejnými testy jako ty odporové. Na obrázku 34 je znázorněna reakce na změnu vlhkosti vzduchu při teplotě 30 °C. Následující grafy jsou uvedeny v příloze D.



Obr. 33 Kapacitní kulatý snímač

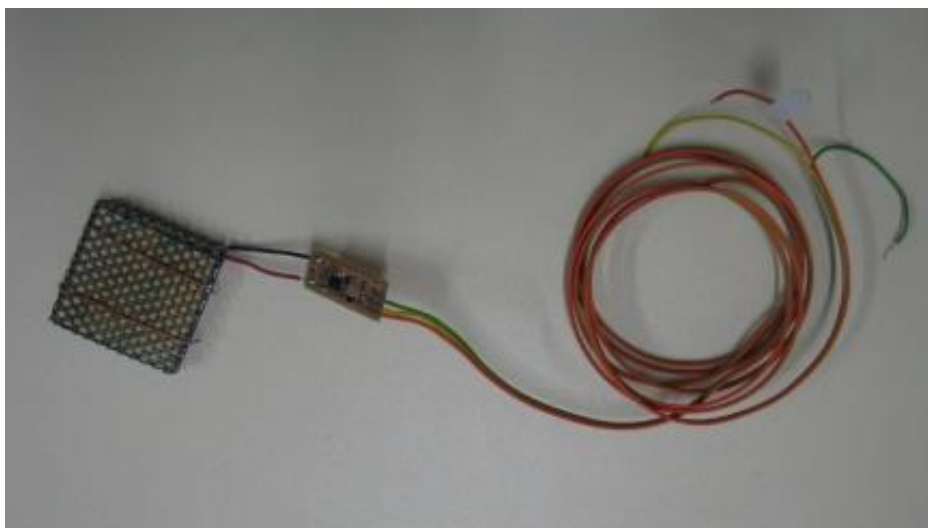
Při vyšších relativních vlhkostech vzduchu si lze všimnout, že křivky jednotlivých snímačů, se od sebe vzdalují. Pravděpodobnou příčinou může být zjištěná koroze na vodičích. Tato koroze vznikla zřejmě u měření jedné z vyšší relativní vlhkosti a u dalších měření mohla ovlivňovat výsledky.



Obr. 34 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 30 °C

### Kapacitní pěnové snímače čtvercového tvaru

Posledními senzory, které byly v klimatické komoře testovány, jsou kapacitní senzory, vyrobené z pěny a tahokovu, viz kap. 6.4.3 (obr. 35). Tyto senzory jsou napojeny na stejný typ čítače frekvence jako předcházející kulaté kapacitní snímače.

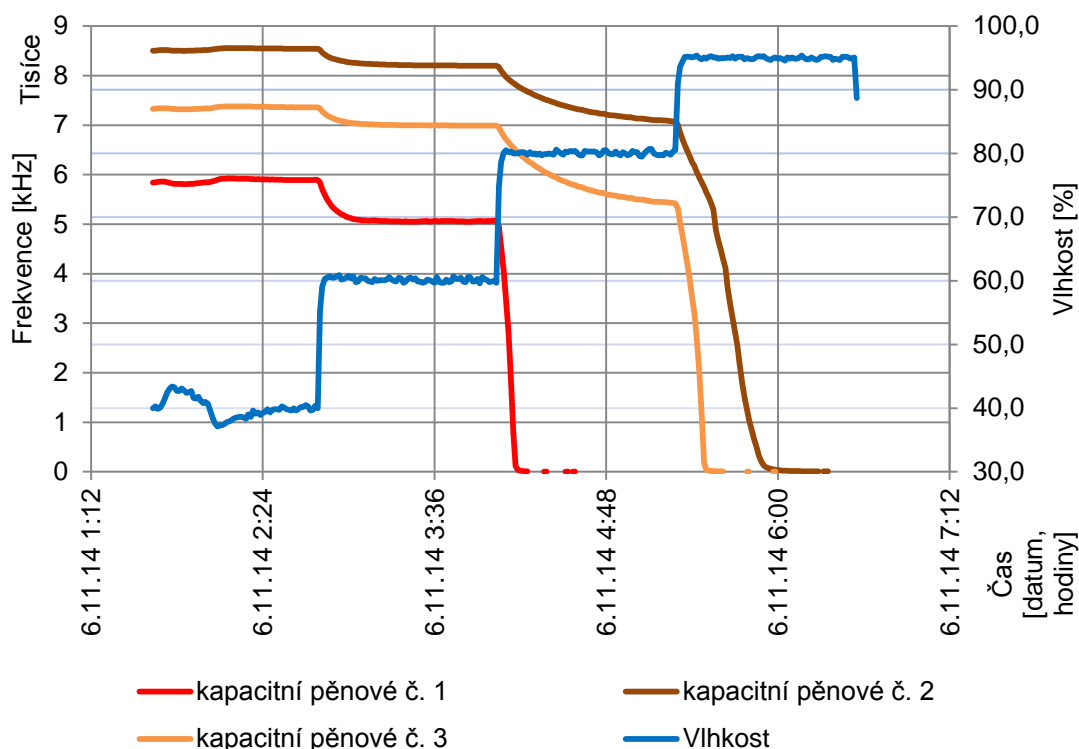


Obr. 35 Kapacitní pěnový snímač čtvercového tvaru

Kapacitní pěnové snímače čtvercového tvaru dopadly v měření nejhůře. V některých částech měření snímače vykreslily odpovídající křivku zatěžování. Jakmile bylo měření v oblastech vysokých hodnot relativní vlhkosti vzduchu, senzory už nereagovaly – nevykreslují odpovídající křivky měření.

Mezi kovovými částmi senzorů zřejmě došlo ke zkratu, vzhledem k hodnotám nuly, které se vyskytují v datech z měření. Tyto čidla tak vůbec nemohly být použity v modelu, kde se uvažuje s oblastí kondenzace vodní páry. Příčinou je pravděpodobně kvalita výroby senzoru.

Na obrázku 36 je znázorněna reakce senzorů na změnu vlhkosti při teplotě 30 °C, následující grafy naleznete v příloze D.

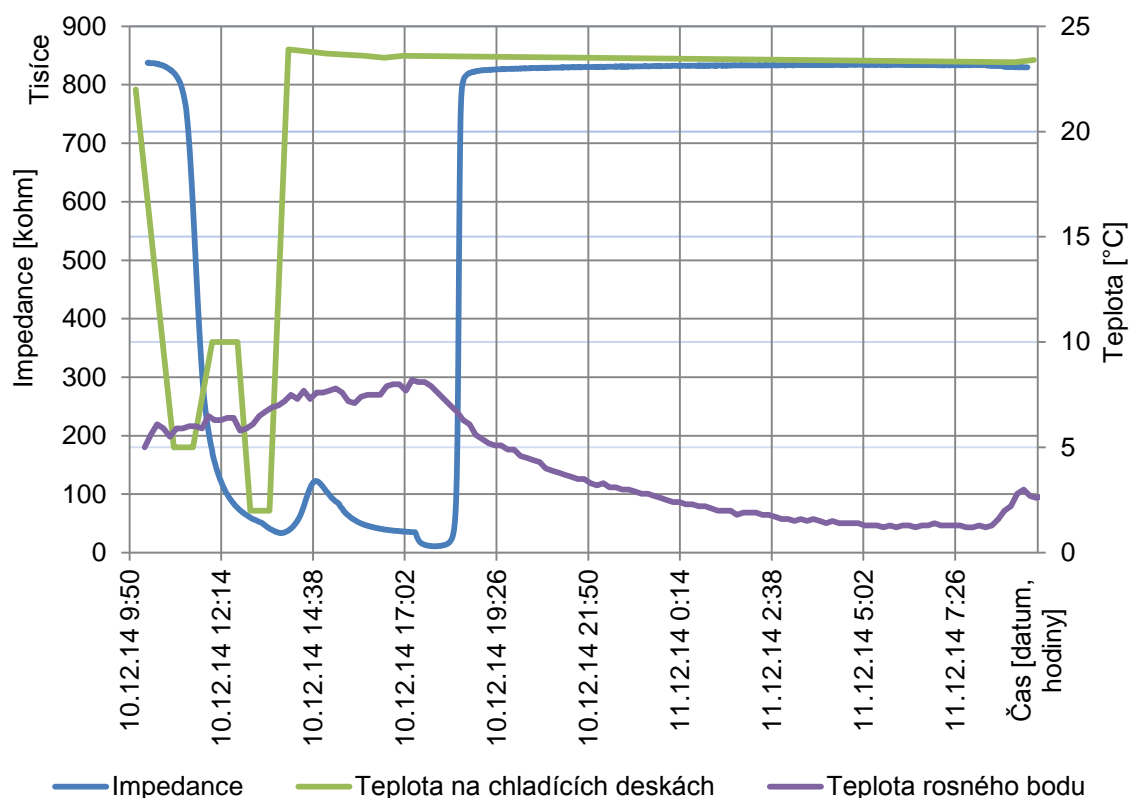


Obr. 36 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 30 °C

### 6.7.2 Výsledky nedestruktivního stanovení kondenzace v modelu konstrukce

Měření probíhalo celkem ve třech dnech. Na začátku prvního měřicího dne byla nastavena teplota na chladících deskách pod hodnotu rosného bodu, zde zůstala hodinu. Poté byla teplota zvýšena o několik stupňů, aby nedocházelo ke kondenzaci a následně poté byla teplota chladících desek opět změněna pod teplotu rosného bodu. Ke konci dne byly chladící desky nastaveny na teplotu okolního vzduchu, aby došlo k vysušení modelu i zkoušených senzorů a ověření, zda se senzory vrátí na hodnoty, ze kterých jsme vycházeli. Toto vysušení pokračovalo až do druhého měřicího dne.

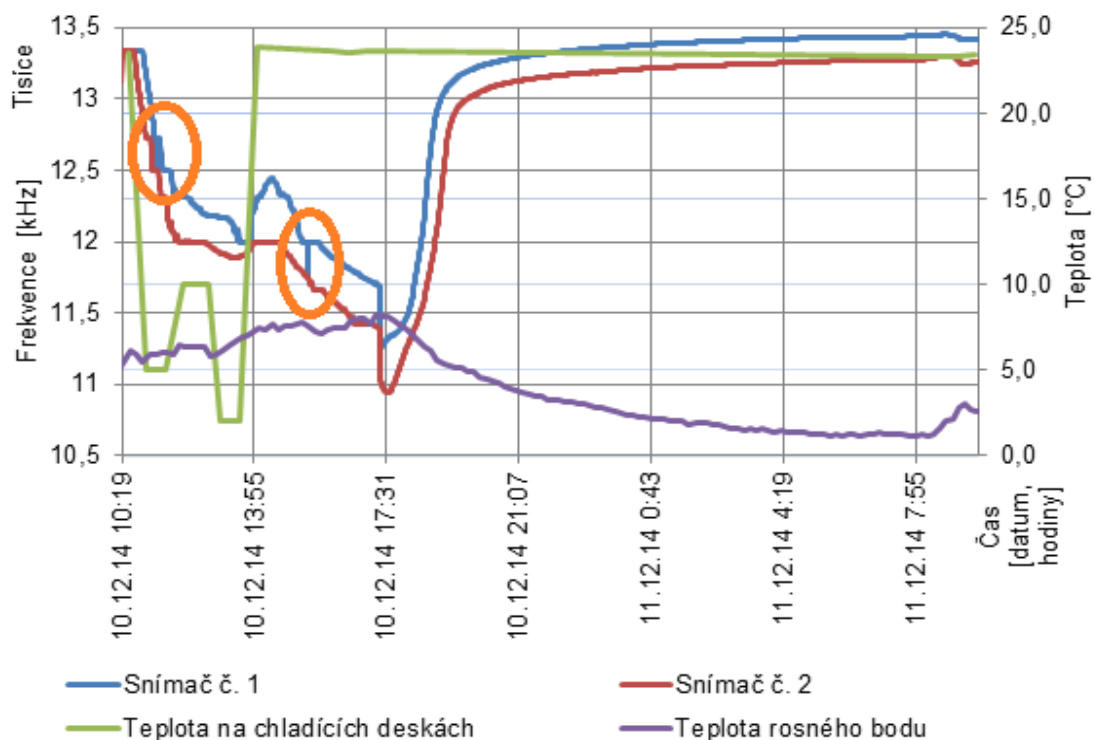
Na obr. 37 je znázorněna reakce odporového senzoru tl. 2 mm a průběh teplot. Při pohledu na modrou křivku, která znázorňuje průběh elektrické impedance, lze říci, že reakce senzoru odpovídá průběhu teploty. Reakce senzoru se projeví až po určité časové prodlevě. Reakce odporového senzoru odpovídá průběhu teplot, nelze jednoznačně určit, zda se projevila i kondenzace vodní páry.



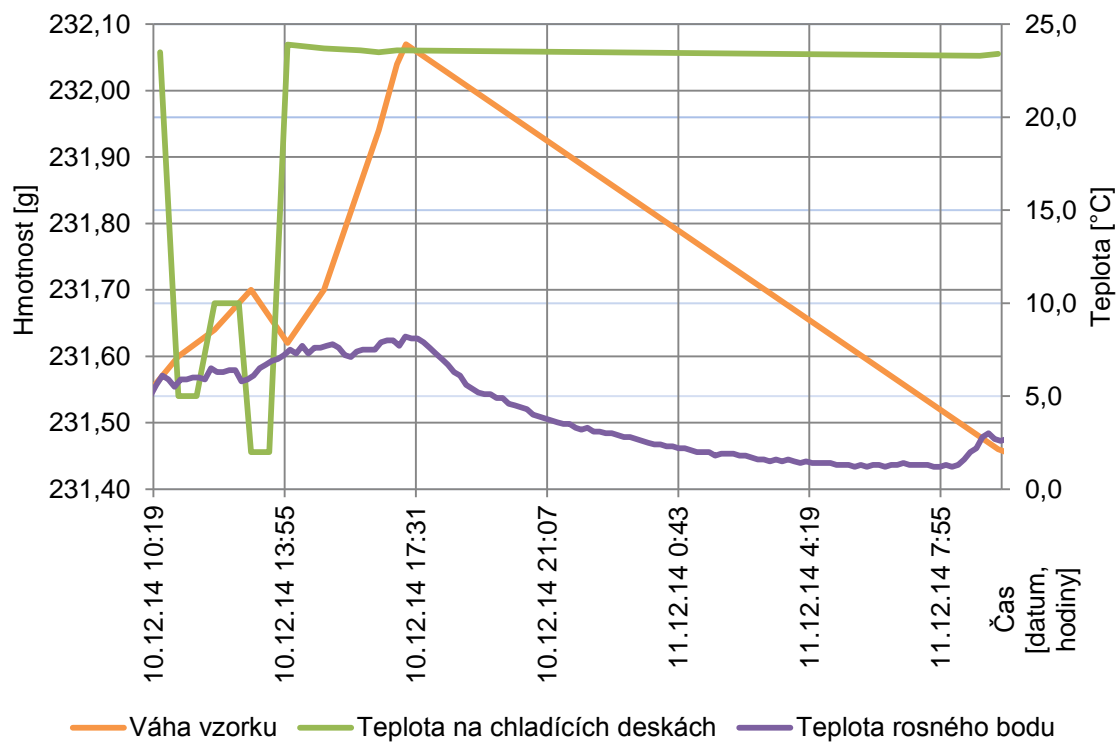
Obr. 37 Grafický průběh prvních dvou měřících dnů odporového dvou vodičového senzoru

Na obrázku 38 je znázorněna reakce kapacitních senzorů. I tyto senzory reagovaly, stejně jako odporový senzor, na průběh teploty po určité časové prodlevě. V grafu se však objevují i výchyly, které v grafu u odporového senzoru nenalezneme. Tyto výchyly by mohly ukazovat na výskyt kondenzace vodní páry.

Na posledním grafu (obr. 39) je znázorněný hmotnostní průběh váženého vzorku, který dokazuje, že ve vyjímátných čtvrcích ke kondenzaci opravdu docházelo. S probíhající kondenzací se hmotnost váženého vzorku zvyšuje, naopak při vysušování dochází ke snížení hmotnosti k výchozím hodnotám.



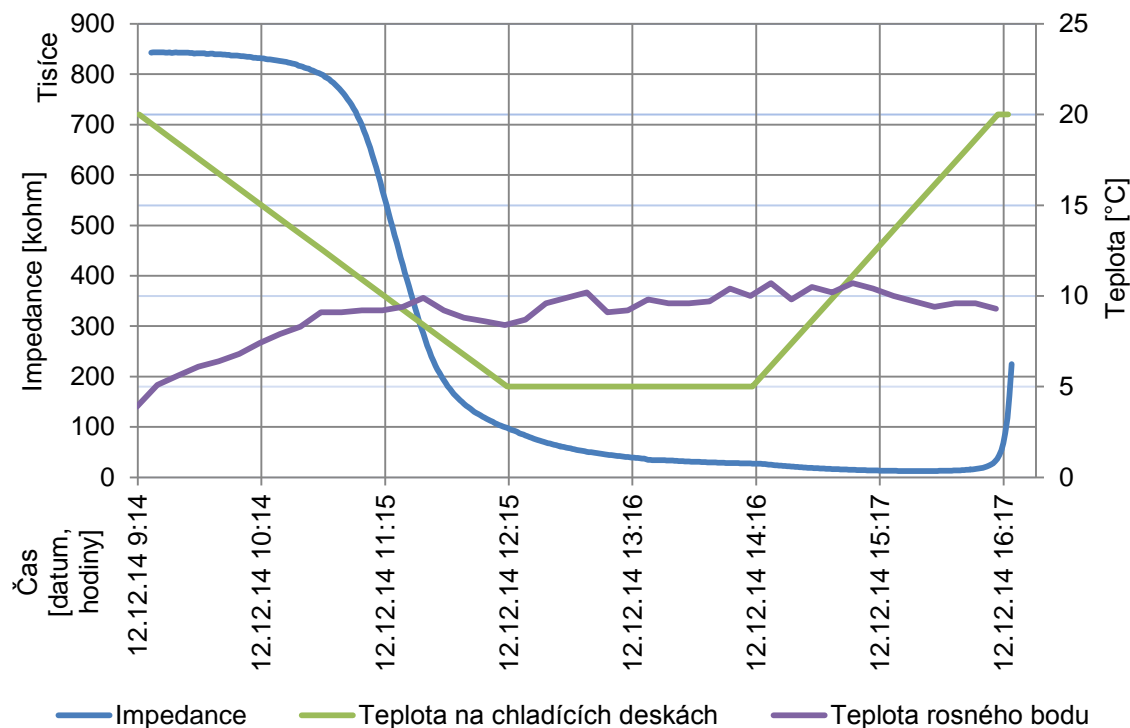
Obr. 38 Grafický průběh prvních dvou měřících dnů kapacitních senzorů



Obr. 39 Grafický průběh váženého vzorku z prvních dvou měřících dnů

Třetí měřicí den byl ve znamení pomalejšího klesání teploty z laboratorních podmínek k hodnotě pod rosný bod a tím detailnějšího prokreslení fáze, kdy hodnoty elektrických veličin klesají.

Odporový senzor (obr. 40) opět reaguje na změnu teploty a v křivce impedance nelze jednoznačně určit místo, kdy došlo ke kondenzaci vodní páry.

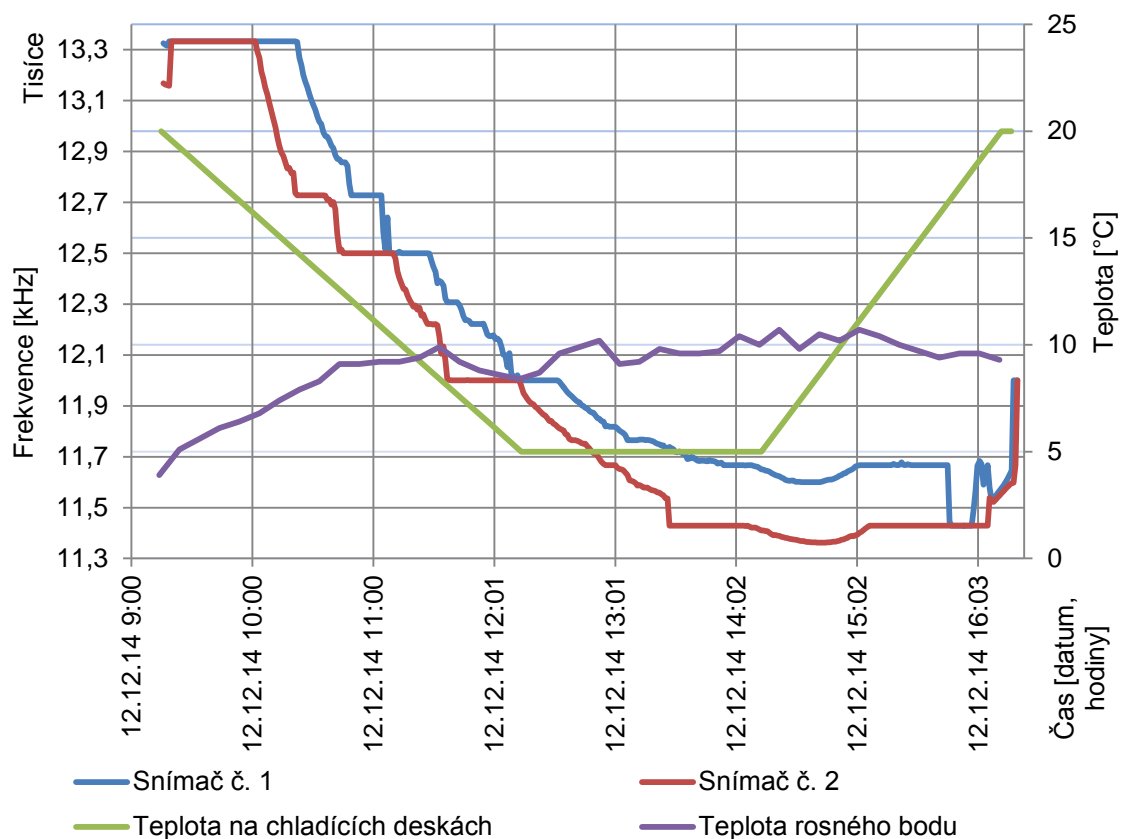


Obr. 40 Grafický průběh třetího měřicího dne odporového dvou vodičového senzoru

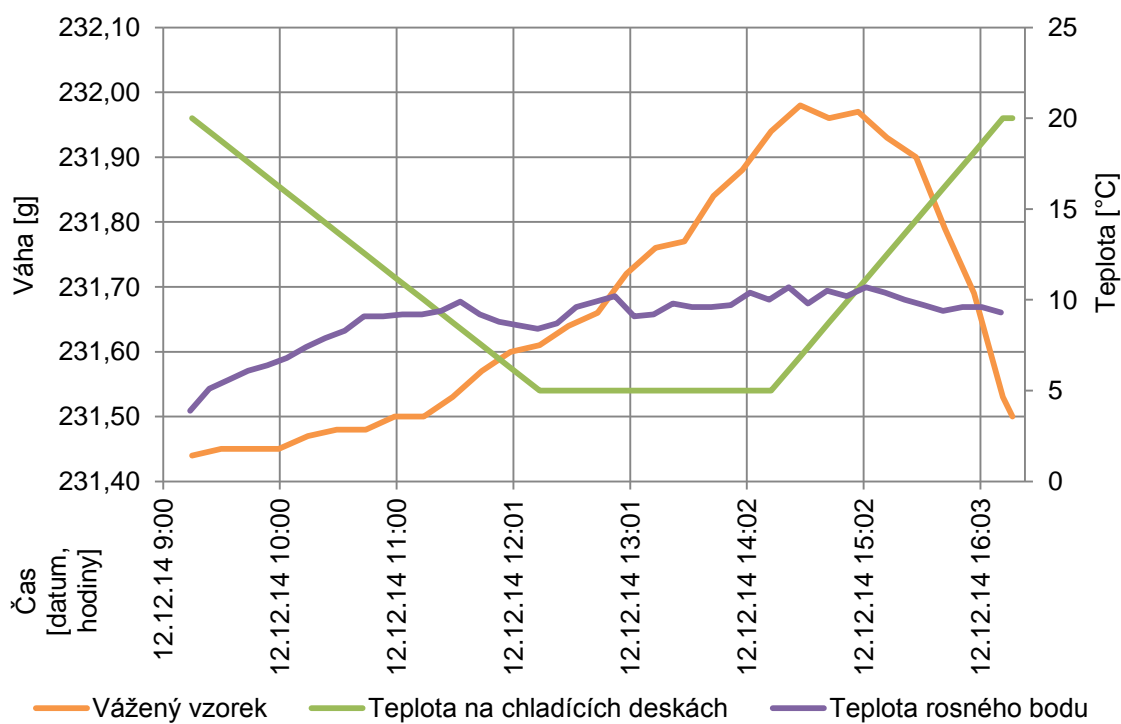
Oproti tomu u kapacitních senzorů (obr. 41) se opět vyskytuje v grafu výchylka (chvíli po jedenácté hodině), která by mohla poukazovat na kondenzaci vodní páry.

Vzorek, který byl vážen na hmotnostní váze, opět potvrzuje nastavené teplotní podmínky. Hmotnost váženého vzorku narůstala nejdříve pozvolna (obr. 42), poté strměji a v poslední fázi měření začala klesat.



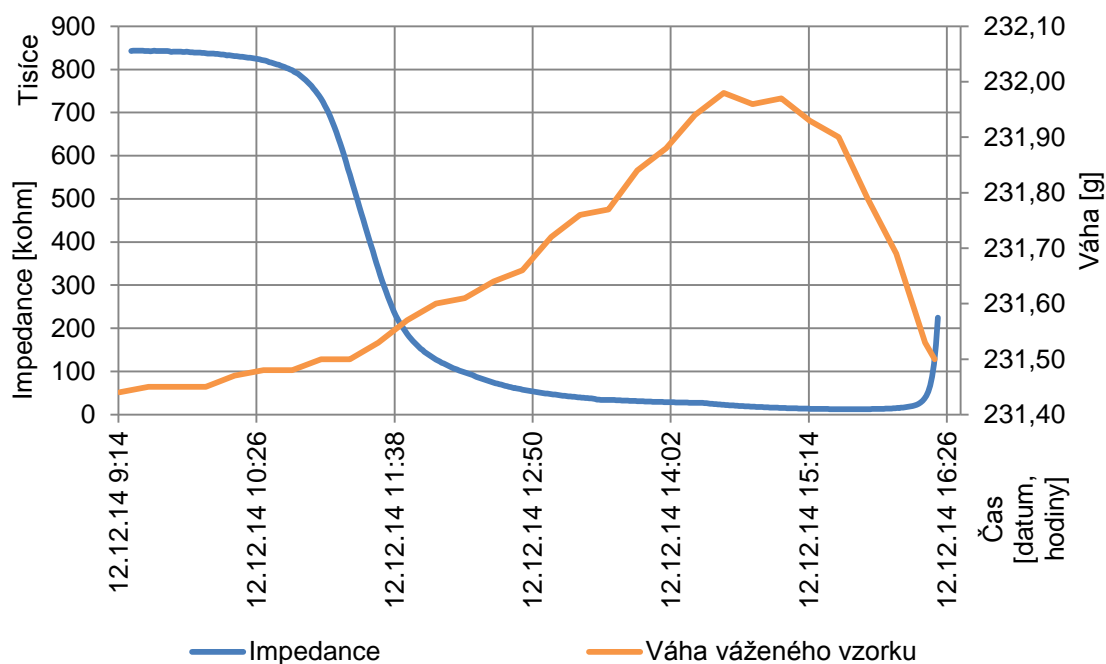


Obr. 41 Grafický průběh třetího měřicího dne kapacitních senzorů

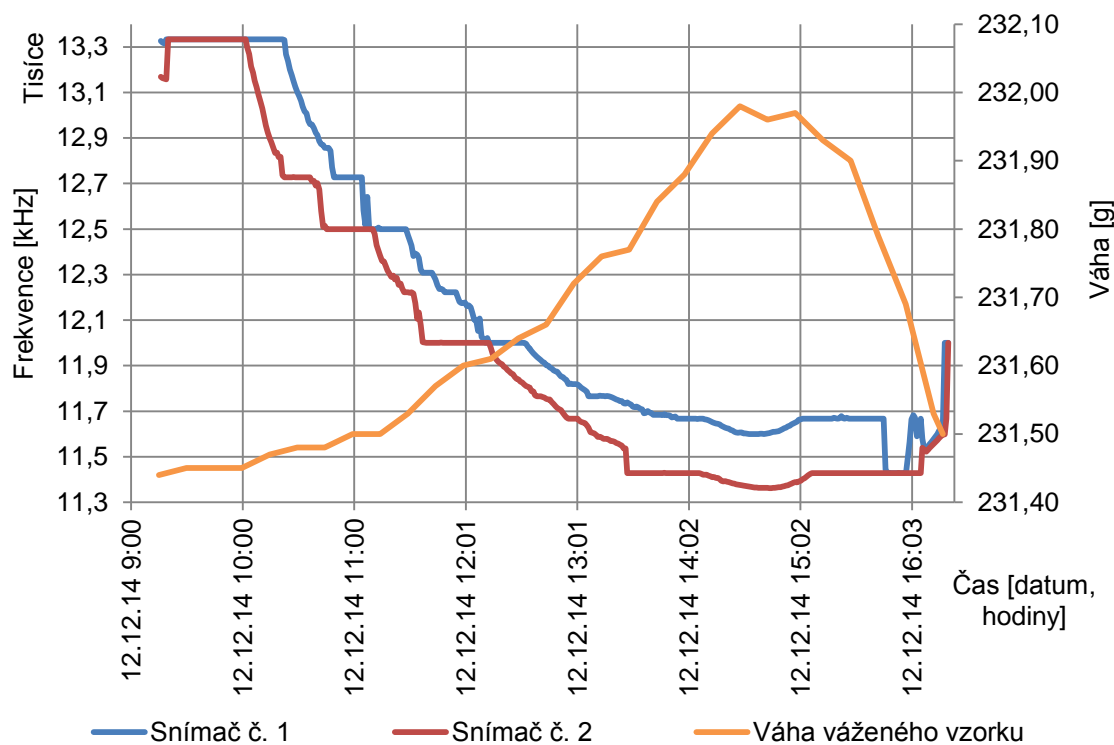


Obr. 42 Grafický průběh váženého vzorku z třetího dne měření

V posledních grafech bych chtěla porovnat křivky elektrické impedance a váženého vzorku a frekvence a váženého vzorku pro lepší znázornění průběhu měření elektrické veličiny v porovnání s hmotností.



Obr. 43 Průběh elektrické impedance odporového snímače a hmotnosti váženého vzorku



Obr. 44 Průběh frekvence kapacitních snímačů a hmotnosti váženého vzorku

## 7 ZÁVĚR

V hlavních bodech uvedu důležité poznatky, ke kterým jsem během vypracování této práce dospěla:

- jako nejvhodnější metoda pro měření vlhkosti ve stavebních konstrukcích se jeví metoda kapacitní. Druhou použitou metodou byla metoda odporová;
- při testování v klimatické komoře je nutné upravovat relativní vlhkost vzduchu pouze jedním směrem (klesat nebo stoupat), aby nedocházelo ke zkreslování hodnot z důvodu hystereze;
- nejstabilnější výsledky vykazovaly průmyslově vyráběné senzory zalité do sádrové kaše;
- vyráběné senzory potvrdili funkčnost reakcí na vzdušnou vlhkost. Je ovšem potřeba zdokonalit jejich výrobu a eliminovat chyby v měření;
- při testování kondenzace v modelu konstrukce jednoplášťové ploché střechy je nutné postupovat podle hodnot z meteorologické stanice, zjistit průběh denní a noční teploty, a tak nastavit teplotní podmínky při měření;
- senzory reagují na změnu podmínek změnou odpovídající elektrické veličiny. Otázkou je, zda byla tato změna reakcí na změnu teploty nebo na změnu vlhkosti vzduchu.
- při testování kondenzace by bylo vhodné mít váhu stále pod vyjímatelným vzorkem, který byl vážen.

## **8 PŘÍNOSY PRÁCE PRO PRAXI A ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU**

Nelze říci, že čidlo je průmyslově uchopitelné. Veškerá naměřená data, slouží pouze pro experimentální účely. Naměřená data v klimatické komoře prokázala, že senzory reagují na vzdušnou vlhkost.

Nedestruktivní měření kondenzace v modelu jednoplášťové ploché střechy potvrdilo chování senzorů, které bylo naměřeno v klimatické komoře. Odporové senzory reagují na změnu teploty, kapacitní senzory reagují na změnu teploty i na výskyt kondenzace.

Tato diplomová práce a provedená měření ukazují, že lze při výběru správných materiálů a měřicí aparatury dosáhnout požadovaných výsledků. Práce je pouze začátkem k dosažení vytíženého cíle, ale především ukazuje možnosti, kterým směrem se lze vyvíjet. Práce je také velmi přínosná, protože ukazuje i špatné cesty.

## 9 DALŠÍ MOŽNOSTI VÝZKUMU

- Nalezení jiných vhodnějších materiálů pro změnu elektrických veličin po absorbování vlhkosti.
- Zdokonalení výroby senzorů vzhledem k použité měřicí metodě.
- Porovnání výpočtového modelu podle ČSN 0540-4 a podle ČSN EN ISO 13788 s váženým vzorkem a s kalibrovanými senzory.
- Opakovatelnost měření z důvodu prokázání funkčnosti senzorů.

---

## SEZNAM POUŽITELNÝCH ZDROJŮ

- [1] Meteocentrum.cz: Encyklopedie meteorologie a klimatologie [online]. [cit. 2014-08-12]. Dostupné z: <http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vlhkost-vzduchu.php>
- [2] Vlhkost vzduchu. In: Encyklopedie Wikipedie: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-08-12]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlhkost\\_vzduchu](http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlhkost_vzduchu)
- [3] ČSN 73 0540-1 *Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie*. Česká technická norma. © Praha: Český normalizační institut, 2005. 68 stran.
- [4] FICKER Tomáš. *Aplikovaná fyzika (S) Modul 02: Kondenzace ve stavebních konstrukcích* [online]. © Tomáš Ficker, Brno: 2008 [cit. 2014-08-12]. Dostupné z: <https://intranet.study.fce.vutbr.cz/studium/materialy/opory.asp>
- [5] Isover: *Ekvivalentní difuzní tloušťka* [online]. © Divize Isover, Saint-Gobain Construction Products CZ a.s. [cit. 2014-08-21]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/ekvivalentni-difuzni-tloustka>
- [6] Kapalnění. Encyklopedie Wikipedie: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kondenzace>
- [7] Husák Miroslav. *Měření vlhkosti vzduchu* [online]. Praha: 2006 [cit. 2014-08-30]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/cviceni/Navody%20na%20cviceni/07.Mereni%20vlhkosti.pdf>
- [8] Mareš Luděk. Tzbinfo. *Vlhkost vzduchu a její měření* [online]. © Copyright Topinfo s.r.o. 2006 [cit. 2014-08-31]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>
- [9] Sedlačík Dušan. Videopodlahy. *Zjišťování vlhkosti v potěrech a jiných stavebních hmotách. Metody měření a měřicí přístroje* [online]. © VIDEOPODLAHY.cz 2013 [cit. 2014-09-01]. Dostupné z: [http://www.videopodlahy.cz/userfiles/files/meranie%20vlhkosti%20gann\\_cz.pdf](http://www.videopodlahy.cz/userfiles/files/meranie%20vlhkosti%20gann_cz.pdf)
- [10] ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Česká technická norma. © Praha: Český normalizační institut, 2011. 56 stran.

- [11] Chloupek, Suchý. *Vlhkost vzduchu*. Měření vlhkosti vzduchu [online]. Brno: 2008 [cit. 2014-09-21]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/mikroklima/www/4%20Vlhkost.htm>
- [12] Psychrometr. In: Encyklopedie Wikipedie: *the free encyklopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-09-21]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Psychrometr>
- [13] Seznam přístrojů pro praktickou zkoušku [online]. Brno: [cit. 2014-09-21]. Dostupné z: <http://zoohygiena.xf.cz/pristroje.htm>
- [14] ČSN 73 0540-3 *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Česká technická norma. © Praha: Český normalizační institut, 2005. 96 stran.
- [15] ČESKO. Zákon č. 406 ze dne 25. října 2000 o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2000. Dostupný z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/?path=/portal/obcan/>
- [16] ČSN EN ISO 12 570 (72 0573) *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě*. Česká technická norma. © Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [17] Pavel Štěpánek. *Měření vlhkosti*. [online] Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, 2011-2014 [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: [http://web.umel.feec.vutbr.cz/BMMS/.%5Cprojekty\\_2004%5CStepanek%5Cindex.htm](http://web.umel.feec.vutbr.cz/BMMS/.%5Cprojekty_2004%5CStepanek%5Cindex.htm)
- [18] ČSN 73 0540-4 *Tepelná ochrana budov – Část 1: Výpočtové metody*. Česká technická norma. © Praha: Český normalizační institut, 2005. 60 stran. [cit. 2014-12-14]
- [19] ČSN EN ISO 13788 *Tepelně vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků – Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce – Výpočtové metody*. Česká technická norma. © Praha: Český normalizační institut, 2002. 40 stran. [cit. 2014-12-14]
- [20] Rovnaníková P., Keršner Z. *Vlastnosti modifikované sádry*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2009. 134 stran. ISBN 978-80-214-3988-7, ISBN 978-80-7204-665-2. [cit. 2014-12-14]

- [21] Kotlík P. *Stavební materiály historických objektů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1999. ISBN 80-7080-347-9 [cit. 2014-12-14]
- [22] I & CS spol. s r.o., *Měřicí přístroje: Vlhkoměry* [online]. Markvartice 55, okres Třebíč, 2010 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.e-pristroje.cz/vlhkomery-drevo.html>
- [23] Anton O., Blažková V., Hobst L., *Měření vlhkosti v praxi soudního inženýra* [online]. Brno: Příspěvek XIV. konference znalců, 2005 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2005-03-175-178.pdf>
- [24] Environmental Measuring Systém Brno, *Products: Gypsum block* [online]. Brno: 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.emsbrno.cz/p.axd/en/Gypsum.Block.html>
- [25] Česká zemědělská univerzita v Praze. Multimediální učebnice hydrologických terénních měření, *Nepřímé metody měření půdní vlhkosti* [online]. Praha: 2013 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://hydrologie.agrobiologie.cz/neprime.html>
- [26] Petr Slanina. WUFI Software. *WUFI Pro* [online]. Praha: 2010 – 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [http://www.wufi.cz/wufi\\_pro/](http://www.wufi.cz/wufi_pro/)
- [27] Ondřej Šíkula. CalA Calculation Area, *Software pro numerické 2D simulace fyzikálních dějů* [online]. Brno: 2010 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/TZB/sikula.o/cala\\_uvod.html](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/sikula.o/cala_uvod.html)
- [28] Delphi. In: Encyklopedie Wikipedie: *the free encyklopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Delphi>
- [29] Braun Medical s.r.o. Zelená hvězda. *Askina Foam* [online]. Praha: 2003-2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://www.zelenahvezda.cz/zdravotnicke-potreby/askina-r-foam>
- [30] ART OF PRODUKTION. GYPSTREND, s.r.o. *Stucco – stavební sádra šedá a bílá* [online]. 2008-2011 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://www.gypstrend.cz/?clanek=18>



- [31] A Premier Farnell Company. Humidity Sensors. *MULTICOMP HCZ-D5-A* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://uk.farnell.com/multicomp/hcz-d5-a/sensor-humidity-20-90-rh--5/dp/1891428?ost=MULTICOMP++HCZ-D5-a>
- [32] Impedance. In: Encyklopedie Wikipedie: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance>
- [33] J. Skopalová, M. Kotouček, P. Adamovský. Multimediální učebnice: Výpočty z elektroanalytických metod. *Základní elektrické veličiny a jejich jednotky* [online]. Olomouc 2008 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/ucebnice2/jednotky.htm>
- [34] METROSERVIS s.r.o. Vlhkoměry. *Vlhkoměr V303 kapacitní indikátor* [online]. Mladá Boleslav 2014 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.vahy-mb.cz/vlhkomer-v-303-kapacitni-indikator-v-dreva-zdiva>
- [35] Loudy. *Vlhkoměr 30130*. [online]. © LOUDY [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: [http://www.nunavut.cz/zbozi/301306\\_big.png](http://www.nunavut.cz/zbozi/301306_big.png)
- [36] GES ELECTRONICS. Čidlo vlhkosti SHY - 2RS [online]. © 1991 – 2014 GES-ELECTRONICS, a.s., [cit. 2014-09-25]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/cidlo-vlhkosti-syh-2rs-GES05600315.html>
- [37] CONRAD. Senzory: Kapacitní polymerové čidlo KFS33-LC [online]. 2014 © Conrad Electronic Česká republika, s.r.o. [cit. 2014-09-25]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/kapacitni-polymerove-cidlo-vlhkosti-kfs33-lc.k156509>
- [38] J. Štětina. *Tepelný stav přístrojů*. [online] Brno: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2003 [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/vozidla/Ka05-01.htm>
- [39] Látal František. *Peltierův článek*. [online] Olomouc: Katedra experimentální fyziky, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://pokusy.upol.cz/skolni-pokusy/elektrina-a-magnetismus/peltieruv-clanek/peltieruv-clanek-41/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina [jednotka]
A	Plocha [ $\text{m}^2$ ]
C	Elektrická kapacita [F]
c	Měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]
d	Tloušťka/vzdálenost vrstvy materiálu [m]
f	Frekvence oscilátoru [Hz]
g	Hustota difúzního toku vodní páry [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]
$g_A$	Hustota difúzního toku vodní páry, která proudí konstrukcí od vnitřního povrchu k hranici A oblasti kondenzace [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]
$g_B$	Hustota difúzního toku vodní páry, která proudí konstrukcí od hranice B oblasti kondenzace k vnějšímu povrchu [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]
$g_c$	Zkondenzované množství vodní páry na rozhraní v konstrukci [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]
$g_{ev}$	Vypařené množství vodní páry na rozhraní v konstrukci [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]
$\dot{g}$	Difúzní tok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
h	Nadmořská výška budovy/ konstrukce [m]
K	Konstanta úměrnosti
L	Délka vodiče [m]
$M_{aj}$	Dílčí množství zkondenzované (vypařitelné) vodní páry pro jasnou oblohu [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]
$M_{az}$	Dílčí množství zkondenzované (vypařitelné) vodní páry pro zataženou oblohu [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]
$M_c$	Dílčí množství zkondenzované vodní páry [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]
$M_{c,N}$	Požadované max. roční množství zkondenzované vodní páry v konstrukci [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]
$M_{ev}$	Dílčí množství vypařitelné vodní páry [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]
m	Hmotnost materiálu, např. vodní páry [kg nebo g]
$m_e$	Rovnovážná hmotnost materiálu ve vlhkém stavu dosažená sorpcí [kg nebo g]
$m_0$	Hmotnost materiálu v suchém stavu [kg nebo g]
N	Frekvenční konstanta závislá na úhlu řezu
p	Parciální tlak vodní páry [Pa]
$p_a$	Atmosférický tlak vzduchu [Pa]
$p_c$	Částečný tlak vodní páry při kondenzaci [Pa]
$p_i$	Částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnitřní straně konstrukce [Pa]
$p_e$	Částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnější straně konstrukce [Pa]

$p_{\text{sat,A}}$	Částečný tlak nasycené vodní páry na hranici A oblasti kondenzace [Pa]
$p_{\text{sat,B}}$	Částečný tlak nasycené vodní páry na hranici B oblasti kondenzace [Pa]
$p_{\text{sat,x}}$	Částečný tlak nasycené vodní páry v místě x
$p_v$	Částečný tlak vodní páry [Pa]
$p_{\text{sat}}$	Částečný tlak nasycené vodní páry [Pa]
$p_x$	Částečný tlak vodní páry v konstrukci
$Q$	Elektrický náboj [C]
$R$	Elektrický odpor materiálu [ $\Omega$ ]
$R_j$	Tepelný odpor j-té vrstvy konstrukce [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ]
$R'_n$	Tepelný odpor na n-tém rozhraní [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ]
$R'_T$	Celkový tepelný odpor konstrukce [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}$ ]
$R_{\text{se}}$	Odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}$ ]
$R_{\text{si}}$	Odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}$ ]
$R_0$	Počáteční elektrický odpor při teplotě $T_0$ [ $\Omega$ ]
$S$	Účinná plocha [ $\text{m}^2$ ]
$s_d$	Ekvivalentní difuzní tloušťka [m]
$T$	Teplota [K]
$T_0$	Počáteční teplota [K]
$t_i$	Doba trvání jasné oblohy [s]
$t_e$	Celková doba trvání teploty venkovního vzduchu $\theta_e$ [s]
$t_z$	Doba trvání zatažené oblohy [s]
$u$	Hmotnostní vlhkost [%]
$u_{\text{sb}}$	Sorpční hmotnostní vlhkost [%]
$V$	Objem materiálu, např. vzduchu [ $\text{m}^3$ ]
$V_w$	Objem volné vlhkosti v materiálu zjištěné sušením [ $\text{m}^3$ ]
$W_p$	Propustnost vodní páry vztažená k částečnému tlaku vodní páry [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ] = [ $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$W_v$	Propustnost vodní páry vztažená k absolutní vlhkosti vzduchu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$Z$	Elektrická impedance [ $\Omega$ ]
$Z_p$	Difuzní odpor vztažený k částečnému tlaku vodní páry [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] = [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$Z_{pA}$	Difúzní odpor od vnitřního povrchu konstrukce k hranici A oblasti kondenzace [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$Z_{pB}$	Difúzní odpor od hranice B oblasti kondenzace k vnějšímu povrchu konstrukce [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$Z_{pi}$	Odpor při přestupu vodní páry na vnitřní straně konstrukce [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$Z_{pe}$	Odpor při přestupu vodní páry na vnější straně konstrukce [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$Z_{pT}$	Odpor konstrukce při prostupu vodní páry [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$Z_{px}$	Difúzní odpor části konstrukce od jejího vnitřního povrchu k místu $x$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$Z_v$	Difúzní odpor vztažený k absolutní vlhkosti vzduchu [ $s \cdot m^{-1}$ ]
$\alpha$	Teplotní součinitel elektrického odporu [-]
$\Delta f$	Změna frekvence způsobená změnou hmotnosti [Hz]
$\Delta p_v$	Rozdíl částečných tlaků vodní páry mezi prostředními oddělenými vrstvou materiálu [Pa]
$\Delta T$	Rozdíl teplot [K];
$\Delta v$	Rozdíl absolutní vlhkosti vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\Delta \varphi_i$	Bezpečnostní vlhkostní přírážka [%]
$\delta$	Součinitel difúzní vodivosti materiálu [ $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$ ] = [s]
$\delta_a$	Součinitel difúzní vodivosti vzduchu [ $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$ ] = [s]
$\epsilon_0$	Permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ ) [ $F \cdot m^{-1}$ ];
$\epsilon_r$	Relativní permitivita prostředí mezi deskami kondenzátoru [ $F \cdot m^{-1}$ ];
$\theta$	Teplota vzduchu [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_{ae,j}$	Teplota venkovního vzduchu při zatažené obloze [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_{ae,ev}$	Teplota venkovního vzduchu při jasné obloze [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_{ai}$	Návrhová teplota vnitřního vzduchu [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_i$	Návrhová vnitřní teplota v zimním období [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_e$	Návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_m$	Průměrná teplota materiálu [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_n$	Teplota na rozhraní materiálů [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_w$	Teplota rosného bodu [ $^{\circ}C$ ]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ]
$\mu$	Faktor difúzního odporu [-]
$\rho$	Objemová hmotnost = hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\rho$	Měrný odpor [ $\Omega \cdot m$ ]
$\varphi$	Relativní vlhkost vzduchu [%]
$\varphi$	Fáze [ $^{\circ}$ ], elektrický potenciál [V]
$\varphi_i$	Relativní vlhkost vnitřního vzduchu [%]
$\varphi_e$	Relativní vlhkost venkovního vzduchu [%]
$\Psi$	Absolutní vlhkost vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\Psi$	Objemová vlhkost původního materiálu/ vzorku [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

---

**Zkratka      Popis zkratky**

AL	Hliník
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
CAD	Computer Aided Design
EPS S	Pěnový polystyren stabilizovaný, desky z pěnového polystyrenu stabilizované
Im	Imaginární složka grafu
LiCl	Chlorid lithia
LED	Light Emitting Diode
Re	Reálná složka osy grafu

**Použité dolní indexy**

a	Rok, roční
c	Kondenzace
e	Vnější strana, exteriér
i	Vnitřní strana, interiér
j	Vrstva konstrukce
m	Průměrné měsíční
max	Maximální dosažená hodnota veličiny
T	Celkový

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1** Grafické znázornění impedance [32]  
**Obr. 2** Vlasový vlhkoměr [35]  
**Obr. 3** Odporové čidlo vlhkosti [36]  
**Obr. 4** Charakteristika odporových senzorů [7]  
**Obr. 5** Kapacitní polymerové čidlo [37]  
**Obr. 6** Téměř lineární závislost kapacitních čidel na relativní vlhkosti při 25°C [7]  
**Obr. 7** Charakteristika vlhkoměrů s vyhřívanými termistory [7]  
**Obr. 8** Augustův a Assmanův psychrometr [13]  
**Obr. 9** Elektrolytický vlhkoměr [38]  
**Obr. 10** Hrotový vlhkoměr pro měření vlhkosti dřeva a stavebních materiálů s měřicími hroty do měkkého dřeva [22]  
**Obr. 11** Kapacitní indikátor vlhkosti dřeva a stavebních hmot V303 [34]  
**Obr. 12** Sádrový válec pro měření vlhkosti v půdě a kresba s umístěním vložených elektrod [24]  
**Obr. 13** Stanovení částečného tlaku vodní páry  $p_x$  uvnitř konstrukce  
**Obr. 14** Schéma výpočtu a výskytu kondenzace vodní páry v konstrukci, graficko - výpočtová metoda  
**Obr. 15** Umístění senzoru v jednoplášťové ploché střeše  
**Obr. 16** Stavební bílá  $\beta$  sádra, použita pro výrobu senzorů [30]  
**Obr. 17** Polyuretanová pěna Askina Foam [29]  
**Obr. 18** Konstrukce odporového čtyřvodičového snímače  
**Obr. 19** Pomůcky pro výrobu sádrové kaše a vyrobená sádrová kaše  
**Obr. 20** Nanášení sádry mezi měděné vodiče, snímač po stržení přebytečného množství sádry  
**Obr. 21** Vlhkostní čidlo MULTICOMP HCZ-D5-A [31]  
**Obr. 22** Vlevo – konstrukce z tahokovu o rozměrech 50x50x10 mm, vpravo – horní část konstrukce 50x50 mm s již natavenou pěnou Askinou Foam  
**Obr. 23** Vlevo – osazení polyuretanové pěny na dřevěný špalík, vpravo – nahřátí konstrukce z tahokovu v keramické peci na 1000 °C  
**Obr. 24** Vlevo – natavení tahokovu na polyuretanovou pěnu pomocí ocelových kleští, vpravo – spodní část snímače  
**Obr. 25** Protilehlá strana pěny s nataveným středním kusem tahokovu o rozměrech 45x45 mm  
**Obr. 26** Zarovnání pěny s tahokovem  
**Obr. 27** Snímač s napájenými vodiči, s měděnými drátky a převodníkem  
**Obr. 28** Peltierův článek [39]  
**Obr. 29** Odporový čtyřvodičový snímač čtvercového tvaru

- Obr. 30** Průběh elektrické impedance odporových sádrových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 30 °C
- Obr. 31** Odporový kulatý dvouvodičový snímač
- Obr. 32** Průběh elektrické impedance odporových kulatých dvouvodičových snímačů při teplotě 30 °C
- Obr. 33** Kapacitní kulatý snímač
- Obr. 34** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 30 °C
- Obr. 35** Kapacitní pěnový snímač čtvercového tvaru
- Obr. 36** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 30 °C
- Obr. 37** Grafický průběh prvních dvou měřících dnů odporového dvouvodičového senzoru
- Obr. 38** Grafický průběh prvních dvou měřících dnů kapacitních senzorů
- Obr. 39** Grafický průběh váženého vzorku z prvních dvou měřících dnů
- Obr. 40** Grafický průběh třetího měřícího dne odporového dvouvodičového senzoru
- Obr. 41** Grafický průběh třetího měřícího dne kapacitních senzorů
- Obr. 42** Grafický průběh váženého vzorku z třetího dne měření
- Obr. 43** Průběh elektrické impedance odporového snímače a hmotnosti váženého vzorku
- Obr. 44** Průběh frekvence kapacitních snímačů a hmotnosti váženého vzorku

**Obrázek B.1** Teploměr - vlhkoměr COMMETER D3631

**Obrázek B.2** Klimatická komora Vötsch Industrietechnik

**Obrázek B.3** Rozsah vlhkosti

**Obrázek B.4** LCR HiTESTER 3532 HIOKI

**Obrázek B.5** Zdroj napětí TESLA BK 127

**Obrázek B.6** Univerzální čítač frekvence Hewlet packard 53131 A

**Obrázek B.7** Hmotnostní váha METTLER, typ college 244

**Obrázek D.1** Reakce senzorů na vysokou vlhkost při teplotě 30 °C

**Obrázek D.2** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu snímače č. 1 při 30°C

**Obrázek D.3** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 20°C

**Obrázek D.4** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 10°C

**Obrázek D.5** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 0°C

**Obrázek D.6** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě -10°C

**Obrázek D.7** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.8** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě  $30^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.9** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.10** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě  $10^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.11** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě  $30^{\circ}\text{C}$  a průchodu střídavého el. proudu

**Obrázek D.12** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a průchodu střídavého el. proudu

**Obrázek D.13** Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě  $10^{\circ}\text{C}$  a průchodu střídavého el. proudu

**Obrázek D.14** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.15** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $10^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.16** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.17** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $-10^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.18** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.19** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $30^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.20** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.21** Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě  $10^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.22** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.23** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $10^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.24** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.25** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $-10^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.26** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.27** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $30^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.28** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.29** Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě  $10^{\circ}\text{C}$

**Obrázek D.30** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$



**Obrázek D.31** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 10 °C

**Obrázek D.32** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 0 °C

**Obrázek D.33** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě -10 °C

**Obrázek D.34** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě -20 °C

**Obrázek D.35** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 30 °C

**Obrázek D.36** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 20 °C

**Obrázek D.37** Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 10 °C

**Obrázek E.1** Rozměření podpůrné konstrukce z pěnového polystyrénu

**Obrázek E.2** Řezání podpůrné konstrukce

**Obrázek E.3** Řezání hydroizolační fólie DEKPLAN

**Obrázek E.4** Izolování horní strany hliníkové desky reflexní fólií

**Obrázek E.5** Vyjímatelý čtverec ze skelně plsti s kapacitním senzorem

**Obrázek E.6** Vyjímatelý čtverec s osazeným senzorem a geotextilií

**Obrázek E.7** Vyjímatelý čtverec s osazenou povlakovou hydroizolací a oblepený hliníkovou lepicí páskou

**Obrázek E.8** Vyjímatelý čtverec uložený v podpůrné konstrukci

**Obrázek E.9** Pohled na měřicí soustavu zepředu

**Obrázek E.10** Pohled na měřicí soustavu zboku

## SEZNAM TABULEK

**Tabulka A.1:** Informace o použitém výpočetním nástroji

**Tabulka A.2:** Popis hodnocených konstrukcí

**Tabulka A.3:** Okrajové podmínky výpočtu

**Tabulka A.4:** Skladby konstrukcí od interiérů

**Tabulka A.5:** Šíření vodní páry v konstrukci dle ČSN 73 0540-4

**Tabulka A.6:** Šíření vodní páry v konstrukci dle ČSN EN ISO 13788:

**Tabulka A.7:** Souhrnná tabulka – šíření vodní páry v konstrukci

**Tabulka C.1:** Pevnostní třídy sádry [20]

**Tabulka C.2:** Dělení sádry podle počátku a doby tuhnutí [20]

**Tabulka C.3:** Rozdělení sádry podle jemnosti mletí [20]

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A	Příklad výpočtu kondenzace uvnitř konstrukce
Příloha B	Popis používaných měřících zařízení
Příloha C	Vlastnosti sádky a její druhy
Příloha D	Grafické znázornění změny elektrických vlastností senzorů při odlišných podmínkách teploty a vlhkosti vzduchu v klimatické komoře
Příloha E	Fotodokumentace výroby zjednodušeného modelu konstrukce jednoplášťové ploché střechy

## PŘÍLOHY

## A PŘÍKLAD VÝPOČTU KONDENZACE UVNITŘ KONSTRUKCE

Tabulka A.1: Informace o použitém výpočetním nástroji

Výpočetní nástroj:	Tepelná technika 1D - Software pro stavební fyziku firmy DEK a.s.
Verze:	2.4.6
Bližší informace na:	<a href="http://www.stavebni-fyzika.cz">www.stavebni-fyzika.cz</a>

Tabulka A.2: Popis hodnocených konstrukcí

Vnitřní konstrukce:	NE
Charakter konstrukce:	Strop nebo střecha (tepelný tok nahoru)
Konstrukce dvouplášťová s větranou vzduchovou vrstvou:	NE
Konstrukce ve styku se zeminou:	NE
Součinitel prostupu tepla stanoven:	výpočtem

Tabulka A.3: Okrajové podmínky výpočtu

Odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce (šíření vlhkosti / šíření tepla)	$R_{si}$	0,25	0,1	$(m^2 \cdot K)/W$
Odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce (šíření vlhkosti / šíření tepla)	$R_{se}$	0,04	0,04	$(m^2 \cdot K)/W$
Návrhová vnitřní teplota:	$\theta_i$	20,0	$^{\circ}C$	
Návrhová teplota vnitřního vzduchu:	$\theta_{ai}$	20,6	$^{\circ}C$	
Relativní vlhkost vnitřního vzduchu:	$\varphi_i$	50	%	
Bezpečnostní vlhkostní přírážka:	$\Delta\varphi_i$	5	%	
Návrhová teplota venkovního vzduchu:	$\theta_e$	-15,0	$^{\circ}C$	
Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu:	$\varphi_e$	84	%	
Nadmořská výška budovy (terénu):	$h$	250	m n. m.	

Okrajové podmínky (průměrné měsíční):							
Měsíc		1	2	3	4	5	6
n	[-]	31	28	31	30	31	30
$\theta_{e,m}$	[°C]	-2,0	-0,2	3,9	9,2	13,9	17,3
$\varphi_{e,m}$	[%]	81	81	79	77	74	71
$\theta_{i,m}$	[°C]	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
$\varphi_{i,m}$	[%]	67	70	68	68	70	72
Měsíc		7	8	9	10	11	12
n	[-]	31	31	30	31	30	31
$\theta_{e,m}$	[°C]	18,5	18,3	14,2	9,2	3,8	-0,1
$\varphi_{e,m}$	[%]	69	70	73	77	79	81
$\theta_{i,m}$	[°C]	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
$\varphi_{i,m}$	[%]	73	73	70	68	68	70

Tabulka A.4: Skladby konstrukcí od interiéru

1) DEKROOF 01 s parozábranou z asfaltového pásu – nosná vložka – skleněná tkanina

č.	Název vrstvy	Tloušťka vrstvy	Součinitel tepelné vodivosti		Měrná tepelná kapacita	Objemová hmotnost	Faktor dif. odporu
-	-	d	$\lambda$	$\lambda_{ekv}$	c	$\rho$	$\mu$
-	-	[m]	[W/(m·K)]		[J/(kg·K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]
1	Železobeton	0,2000	1,750	-	1020	2400	32
2	GLASTEK 40 SPECIAL MINERAL	0,0040	0,210	-	1470	1400	30 000
3	EPS 100 S	0,2400	0,038	-	1270	25	50
4	DEKPLAN 76	0,0015	0,160	-	960	1400	20 000

## 2) DEKROOF 01 s parozábranou z asfaltového pásu s Al. vložkou

č.	Název vrstvy	Tloušťka vrstvy	Součinitel tepelné vodivosti		Měrná tepelná kapacita	Objemová hmotnost	Faktor dif. odporu
-	-	d	$\lambda$	$\lambda_{ekv}$	c	$\rho$	$\mu$
-	-	[m]	[W/(m·K)]		[J/(kg·K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]
1	Železobeton	0,2000	1,750	-	1020	2400	32
2	GLASTEK AL 40 MINERAL	0,0040	0,210	-	1470	1400	300 000
3	EPS 100 S	0,2400	0,038	-	1270	25	50
4	DEKPLAN 76	0,0015	0,160	-	960	1400	20 000

## 3) DEKROOF 04 s parozábranou z asfaltového pásu – nosná vložka – skleněná tkanina

č.	Název vrstvy	Tl. vrstvy	Součinitel tepelné vodivosti		Měrná tepelná kapacita	Objem. hmotnost	Faktor dif. odporu
-	-	d	$\lambda$	$\lambda_{ekv}$	c	$\rho$	$\mu$
-	-	[m]	[W/(m·K)]		[J/(kg·K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]
1	Železobeton	0,2000	1,750	-	1020	2400	32
2	GLASTEK 40 SPECIAL MINERAL	0,0040	0,210	-	1470	1400	30 000
3	EPS 100 S	0,2400	0,038	-	1270	25	50
4	GLASTEK 30 STICKER PLUS	0,0030	0,210	-	1470	1200	30 000
5	ELASTEK 50 SPECIAL DEKOR	0,0052	0,210	-	1470	1200	30 000

## 4) DEKROOF 04 s parozábranou z asfaltového pásu s Al. vložkou

č.	Název vrstvy	Tl. vrstvy	Součinitel tepelné vodivosti		Měrná tepelná kapacita	Objemová hmotnost	Faktor dif. odporu
-	-	d	$\lambda$	$\lambda_{ekv}$	c	$\rho$	$\mu$
-	-	[m]	[W/(m·K)]		[J/(kg·K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]
1	Železobeton	0,2000	1,750	-	1020	2400	32
2	GLASTEK AL 40 MINERAL	0,0040	0,210	-	1470	1400	300 000
3	EPS 100 S	0,2400	0,038	-	1270	25	50
4	GLASTEK 30 STICKER PLUS	0,0030	0,210	-	1470	1200	30 000
5	ELASTEK 50 SPECIAL DEKOR	0,0052	0,21	-	1470	1200	30 000

Tabulka A.5: Šíření vodní páry v konstrukci dle ČSN 73 0540-4

Konstrukce č.			1)	2)	3)	4)
Roční množství zkondenzované vodní páry:	$M_c$	kg/(m <sup>2</sup> ·a)	0,005	0,000	0,013	0,001
Roční množství vypařitelné vodní páry:	$M_{ev}$	kg/(m <sup>2</sup> ·a)	0,063	0,063	0,015	0,008
Roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry:			aktivní	aktivní	aktivní	aktivní
Hodnocení na požadavky kondenzace vodní páry:			vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
Požadované max. roční množství zkondenzované vodní páry:				$M_{c,N}$	0,100	kg/(m <sup>2</sup> ·a)
Pozn. Výpočet byl proveden bez vlivu sluneční radiace a zabudované vlhkosti.						

Tabulka A.6: Šíření vodní páry v konstrukci dle ČSN EN ISO 13788:

Konstrukce č.			1)	2)	3)	4)
Maximální roční množství zkondenzované vodní páry v konstrukci	$M_{c,N}$	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	0,063	0,000	0,100	0,100
Maximální množství kondenzátu v konstrukci	$M_c$	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	0,006	0,000	0,019	0,001
Roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry:			aktivní	aktivní	pasivní	aktivní
Hodnocení na požadavky kondenzace vodní páry:			+	/	!	+

Vysvětlení hodnocení:

+

 V konstrukci dochází ke kondenzaci vodní páry v průběhu roku, která se v příznivějších měsících vypaří. Maximální množství kondenzátu splňuje požadavky ČSN 73 0540-2.

/

 Konstrukce bez vnitřní kondenzace.

!

 Konstrukce v hodnocení neuspěla, v konstrukci dochází ke kondenzaci vodní páry, která se ani v příznivějších měsících nevypaří.



Tabulka A.7: Souhrnná tabulka – šíření vodní páry v konstrukci

Konstrukce		Šíření vodní páry							
		ČSN 73 0540				ČSN EN ISO 13788			
č.	Název	$M_C$	$M_{C,N}$	Hod.	Bil.	$M_C$	$M_{C,N}$	Hod.	Bil.
[-]	[-]	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$		[-]	[-]	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$		[-]	[-]
1)	DEKROOF 01 s parozábr. z asf. pásu – nosná vložka – skleněná tkanina	0,005	0,100	+	+	0,006	0,063	+	+
2)	DEKROOF 01 s parozábr. z asf. pásu s Al. vložkou	0,000	0,100	+	+	0,000	0,100	+	+
3)	DEKROOF 04 s parozábr. z asf. pásu – nosná vložka – skleněná tkanina	0,001	0,100	+	+	0,001	0,100	+	+
4)	DEKROOF 04 s parozábr. z asf. pásu s Al. vložkou	0,013	0,100	+	+	0,019	0,100	!	!
Legenda: ! ...nevyhovuje požadované hodnotě / pasivní bilance kondenzace a vypařování + ...vyhovuje požadované hodnotě / aktivní bilance kondenzace a vypařování									

## B POPIS POUŽÍVANÝCH MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ

### Teploměr-vlhkoměr COMMETER D3631

Digitální záznamový teploměr-vlhkoměr s připojitelnou externí sondou teploty.

Teplota externí sondy: rozsah měření -50 až +250 °C, přesnost měření dle výrobcem dodané sondy  $\pm 0,4$  °C v rozsahu -50 až +100 °C;

Relativní vlhkost: rozsah měření 5 až 95 % relativní vlhkosti, přesnost  $\pm 2,5$  % relativní vlhkosti v rozsahu 5 a 95 % relativní vlhkosti při 23 °C.



Obrázek B.1 Teploměr - vlhkoměr COMMETER D3631

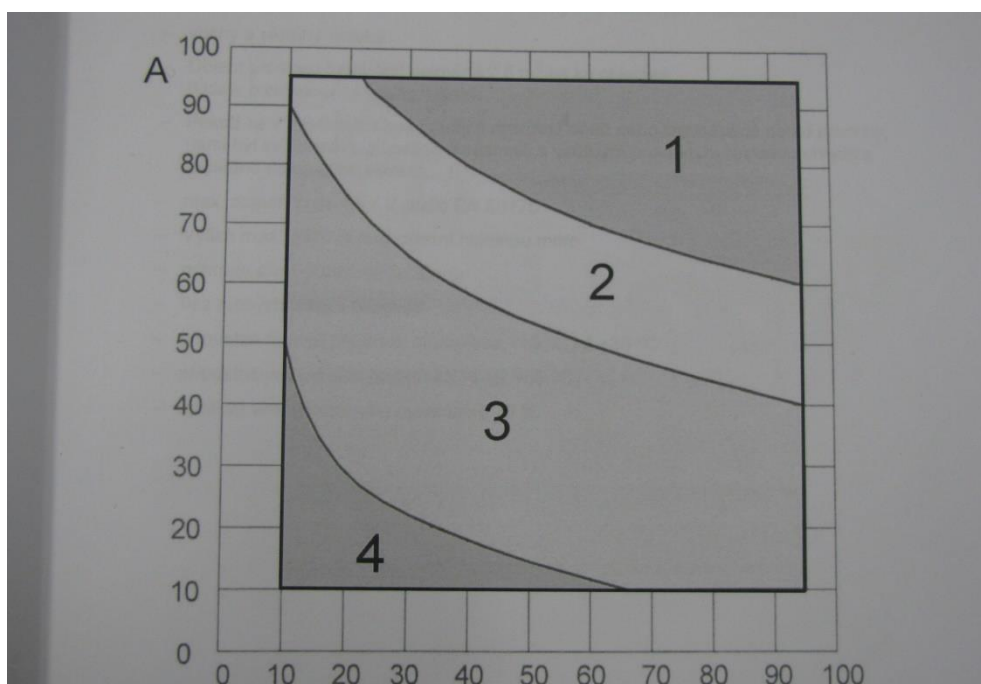
### Klimakomora Vötsch Industrietechnik

Klimatizovaná komora s možnou úpravou teploty a vlhkosti vzduchu (obr. B.2). Objem komory je 600 litrů.

Rozsah měření s veškerým vybavením je pro teplotu od 10 °C do 95 °C, rozsah měření pro relativní vlhkost je od 10 do 95 % relativní vlhkosti. V případě klimakomory na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií však není součástí sušička stlačeného vzduchu, proto je rozsah měření omezen pouze na oblasti 1-3 dle obrázku B.3.



Obrázek B.2 Klimatická komora Vötsch Industrietechnik



Obrázek B.3 Rozsah vlhkosti

### LCR HiTESTER 3532 HIOKI

Zařízení pro měření široké škály elektrických veličin, především pro testování elektronických součástek.

Disponuje těmito vlastnostmi:

- rozmezí hodnot měření 4 Hz až 300 MHz,

- základní přesnost  $Z$ :  $\pm 0,08 \%$ ,  $\theta = \pm 0,05^\circ$ ;
- měření frekvence v rozmezí 42 Hz až 5 MHz;
- dotykový ovládací panel;
- možnost měření čtrnácti elektrických veličin.



Obrázek B.4 LCR HiTESTER 3532 HIOKI

### Zdroj napětí TESLA BK 127

Jedná se o zdroj napětí TESLA BK 127, na kterém lze nastavit velikost napětí ve voltech [V] a tomu odpovídající velikost protékajícího proudu v ampérech [A]. Rozpětí hodnot je od 0 do 20 V. Lze zvolit, zda se bude jednat o střídavý nebo stejnosměrný proud.



Obrázek B.5 Zdroj napětí TESLA BK 127

**Univerzální čítač frekvence Hewlet packard 53131 A**

Hewlet packard 53131 A je univerzální čítač frekvence pro rychlé zpracování signálu. Rozlišení tohoto přístroje je 10 číslic za sekundu, časový interval rozlišení je 500 ps. Přístroj je dodáván se dvěma kanály, které měří až 225 MHz a třetím volitelným kanálem, který měří až 3, 5 nebo 12,4 GHz.



Obrázek B.6 Univerzální čítač frekvence Hewlet packard 53131 A

**Hmotnostní váha, výrobce METTLER, typ college 244**

Váha od výrobce METTLER typu college 244 je hmotnostní váha s maximálním hmotnostním rozsahem 240 g a přesností na tři desetinná místa.



Obrázek B.7 Hmotnostní váha METTLER, typ college 244

## C VLASTNOSTI SÁDRY A JEJÍ DRUHY

Sádra patří k nejstarším stavebním materiálům. Hlavní surovinou pro její výrobu je sádrovec, který se v České republice těží v přírodním nalezišti u Kobeřic na Opavsku. Těžená surovina, která sádrovec obsahuje, však není čistým sádrovcem, obsah sádrovce činí 60 až 85 %. Pro výrobu senzorů bude použita rychletuhnoucí sádra, která existuje ve dvou typech –  $\alpha$  sádra a  $\beta$  sádra.

### $\alpha$ sádra

Tento druh sádry se vysušuje ze sádrovce při teplotě 115 až 125 °C a to za zvýšeného tlaku 120 až 130 kPa v autoklávu, v prostředí nasycené vodní páry. Tento druh sádry má vyšší hodnoty pevnosti a tvrdosti. [20]

### $\beta$ sádra

$\beta$  sádra se vyrábí v prostředí nenasyceném vodní párou při teplotě 107 až 160 °C. Pece mohou být rotační, šachtové nebo sušící mlýny, ve kterých se sádrovec suší a mele zároveň. Vlastnosti této sádry jsou nižší pevnost a tvrdost. Při přeměně sádrovce na hemihydrát vzniknou trhlinky v krystalické struktuře. Samotné krystalky ve struktuře jsou neuspořádané a při přípravě sádrové kaše je potřeba více vody. Ztuhlá sádra má větší pórovitost, ale i větší rozpustnost [20, 21].

### Třídění sádry

Sádru třídíme do několika skupin a to podle vlastností, které jsou uvedeny v normě ČSN 72 2301 Sádrová pojiva. Prvním rozdělením sádry je do dvanácti pevnostních tříd podle pevnosti v tlaku po dvou hodinách tvrdnutí. Tuto vlastnost ovlivňuje především čistota sádrovce, vodní součinitel sádrové kaše a doba tvrdnutí. Jednotlivé třídy pevnosti uvádí tabulka C.1.

Dalším tříděním je počátek doby tuhnutí, kde rozeznáváme tři skupiny uvedené v tabulce C.2. Posledním dělením je dělení podle jemnosti namletí, zde máme také tři skupiny, rozdělení je uvedeno v tabulce C.3 [20].

Tabulka C.1: Pevnostní třídy sádry [20]

Třída pojiva	Pevnost v tlaku [N/mm <sup>2</sup> ]	Třída pojiva	Pevnost v tlaku [N/mm <sup>2</sup> ]	Třída pojiva	Pevnost v tlaku [N/mm <sup>2</sup> ]
G-2	2	G-6	6	G-16	16
G-3	3	G-7	7	G-19	19
G-4	4	G-10	10	G-22	22
G-5	5	G-13	13	G-25	25

Tabulka C.2: Dělení sádry podle počátku a doby tuhnutí [20]

Druh sádry	Označení	Počátek tuhnutí – dříve než [min]	Délka tuhnutí – ne déle než [min]
rychle tuhnoucí	A	2	15
normálně tuhnoucí	B	6	30
pomalou tuhnoucí	C	20	-

Tabulka C.3: Rozdělení sádry podle jemnosti mletí [20]

Druh sádry	Označení	Zbytek zrna na síť frakce 0,2 mm [%]
hrubě mleté	I	30
normálně mleté	II	15
jemně mleté	III	2

### Pórovitost sádry

Porozita, tedy tvar, velikost a množství pórů ztvrdlé sádry je závislé na poměru množství záměsové vody použité při přípravě sádrové kaše. Normální vodní součinitel odpovídá hodnotě 0,6-0,9 u běžných typů sáder, s jeho použitím vznikne tzv. kaše normální konzistence podle normy ČSN 72 2301. Průměr rozlití této kaše o normální konzistence musí odpovídat hodnotě 180±5 mm. Vyšší vodní součinitel způsobuje vyšší porozitu a tedy i vyšší nasákavost.

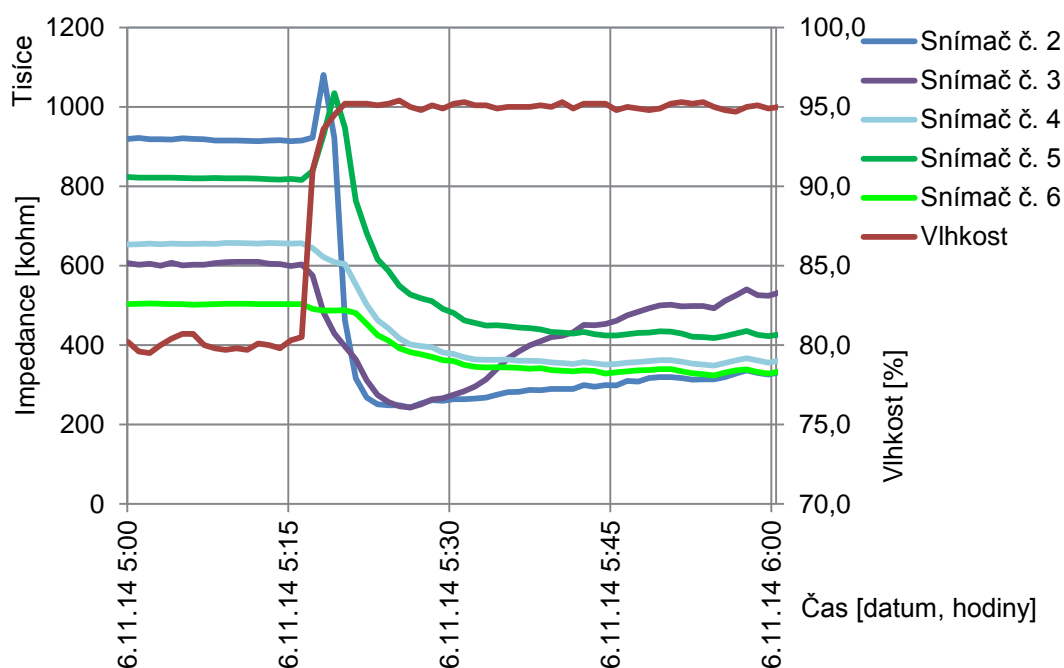
Od pórovitosti sádry se odvíjí její objemová hmotnost. Je logické, že čím je ztvrdlá sádra více pórovitá, její objemová hmotnost klesá. Avšak je závislá



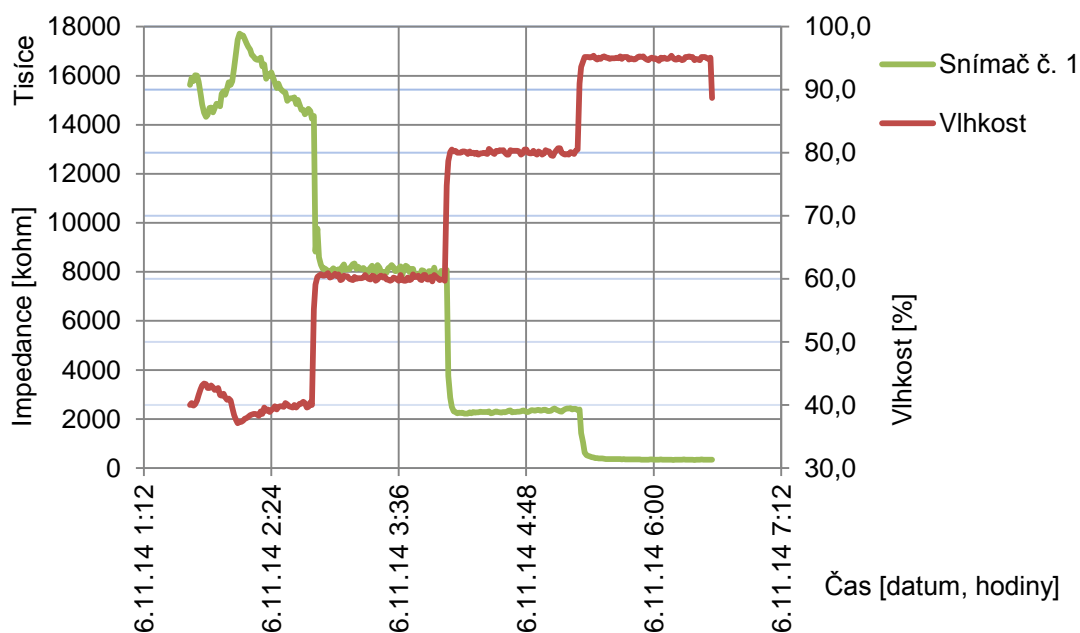
i na přítomnosti množství kapalné vody v pórech. Zpočátku je tedy objemová hmotnost vyšší, postupně jak dochází k vysušování vody z pórů, dochází i ke snižování objemové hmotnosti [20].

## D GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZMĚNY ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ SENZORŮ PŘI ODLIŠNÝCH PODMÍNKÁCH TEPLoty A VLHKOSTI VZDUCHU V KLIMATICKÉ KOMOŘE

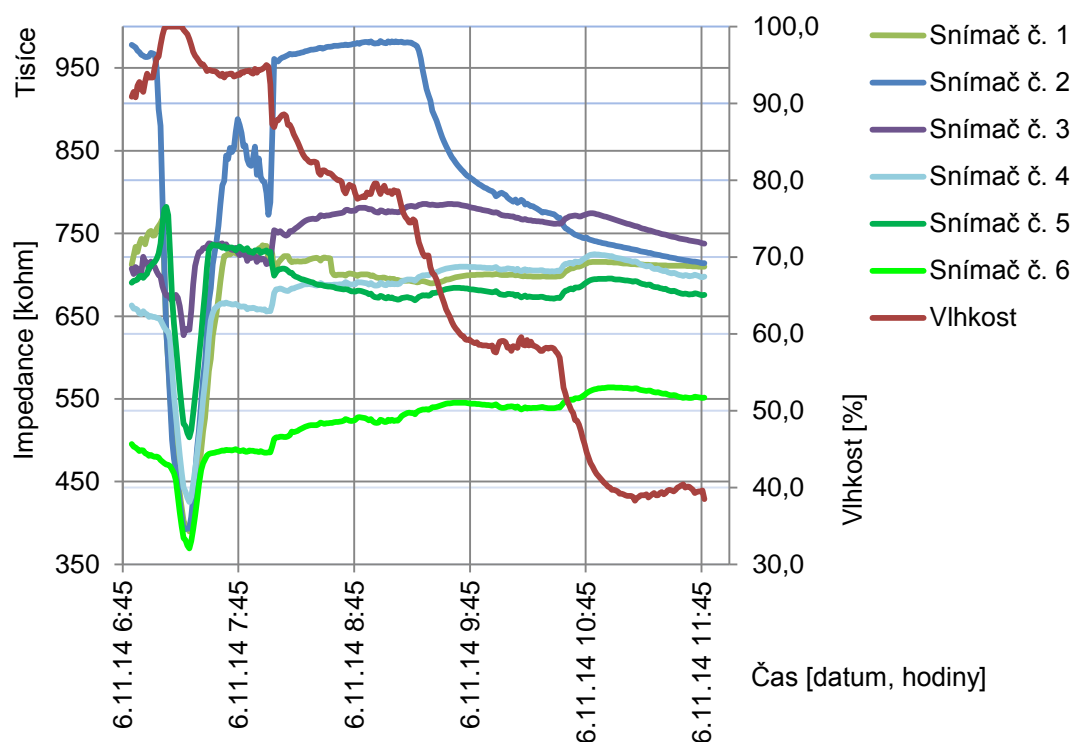
### Odporové čtyřvodičové snímače čtvercového tvaru



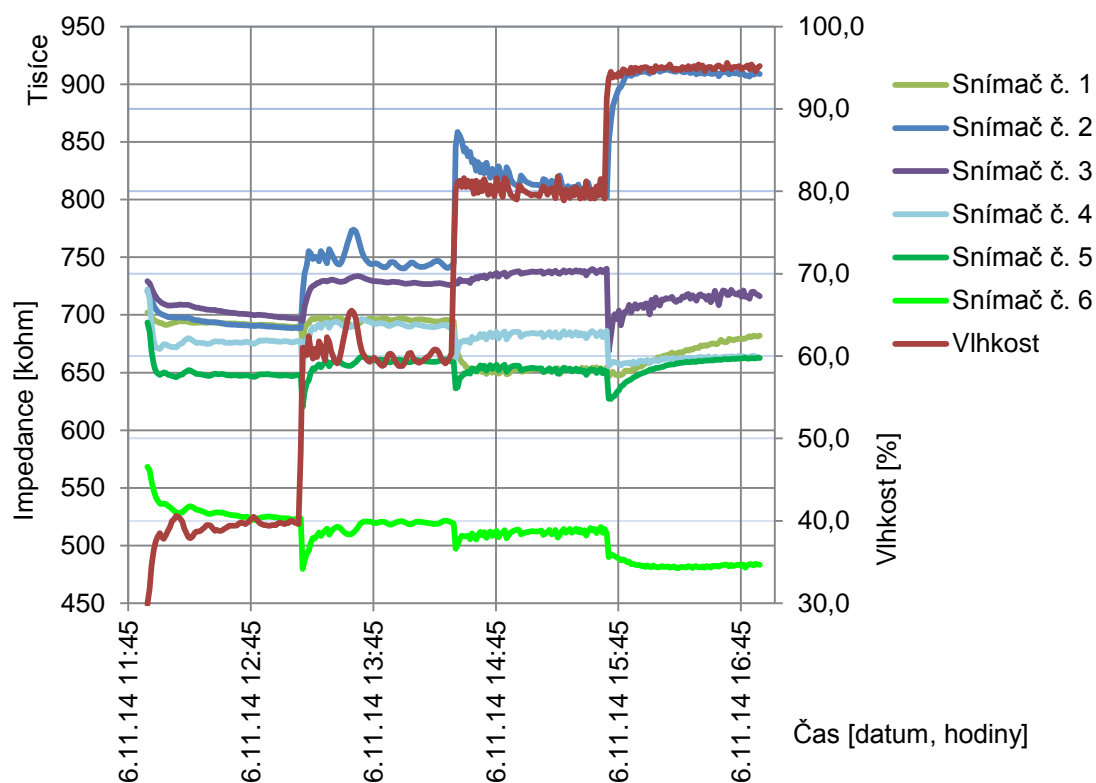
Obrázek D.1 Reakce senzorů na vysokou vlhkost při teplotě 30 °C



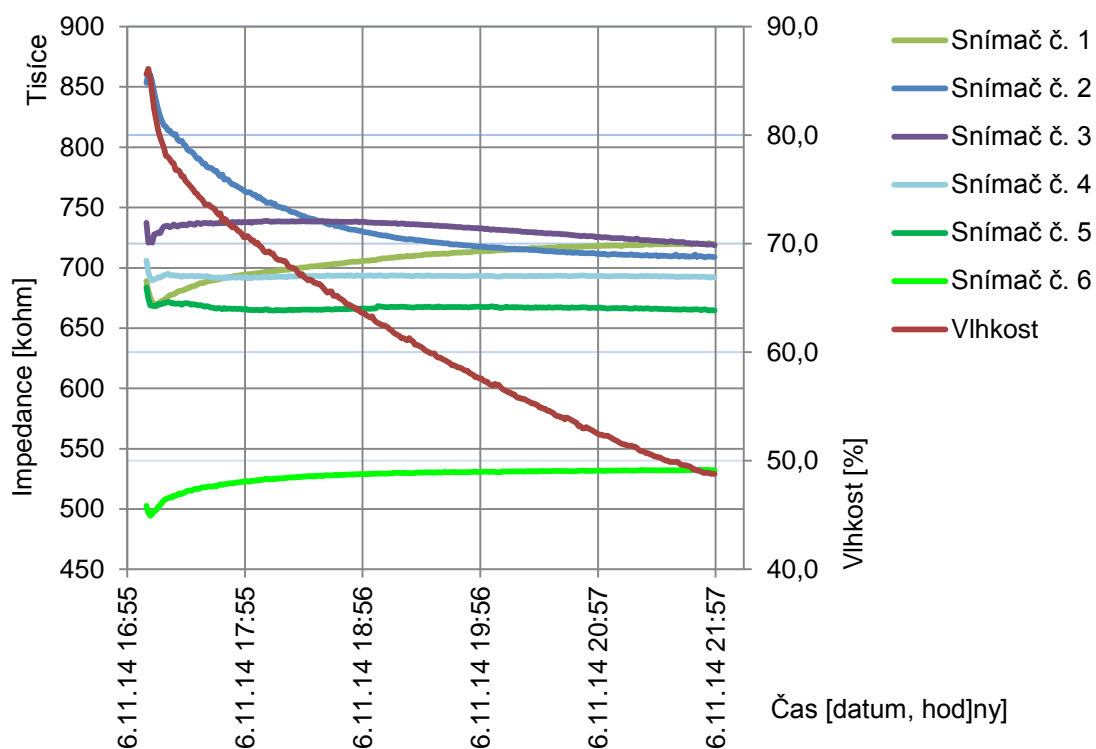
Obrázek D.2 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu  
snímače č. 1 při 30°C



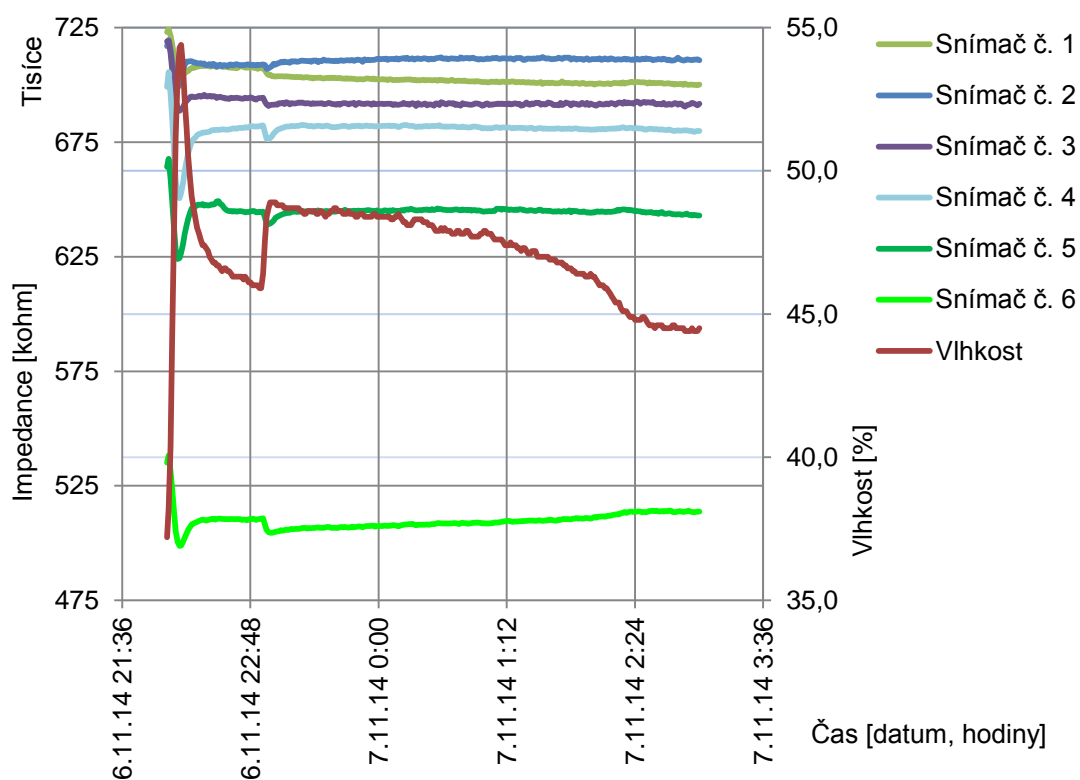
Obrázek D.3 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 20°C



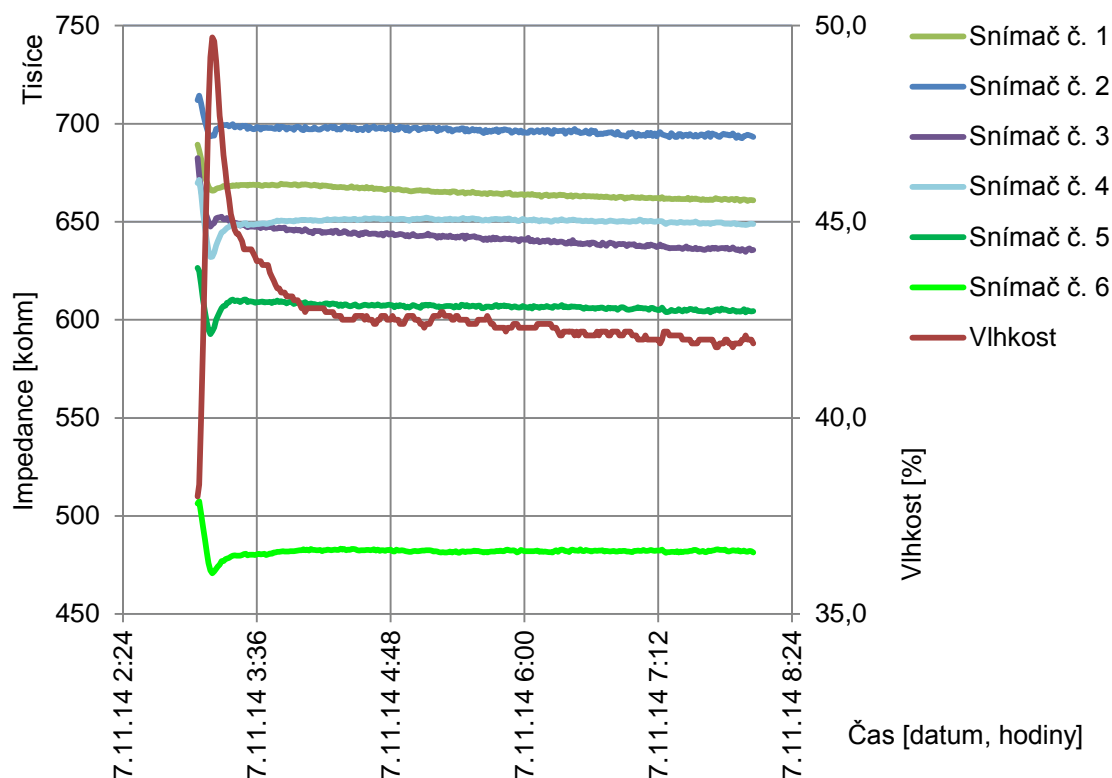
Obrázek D.4 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 10°C



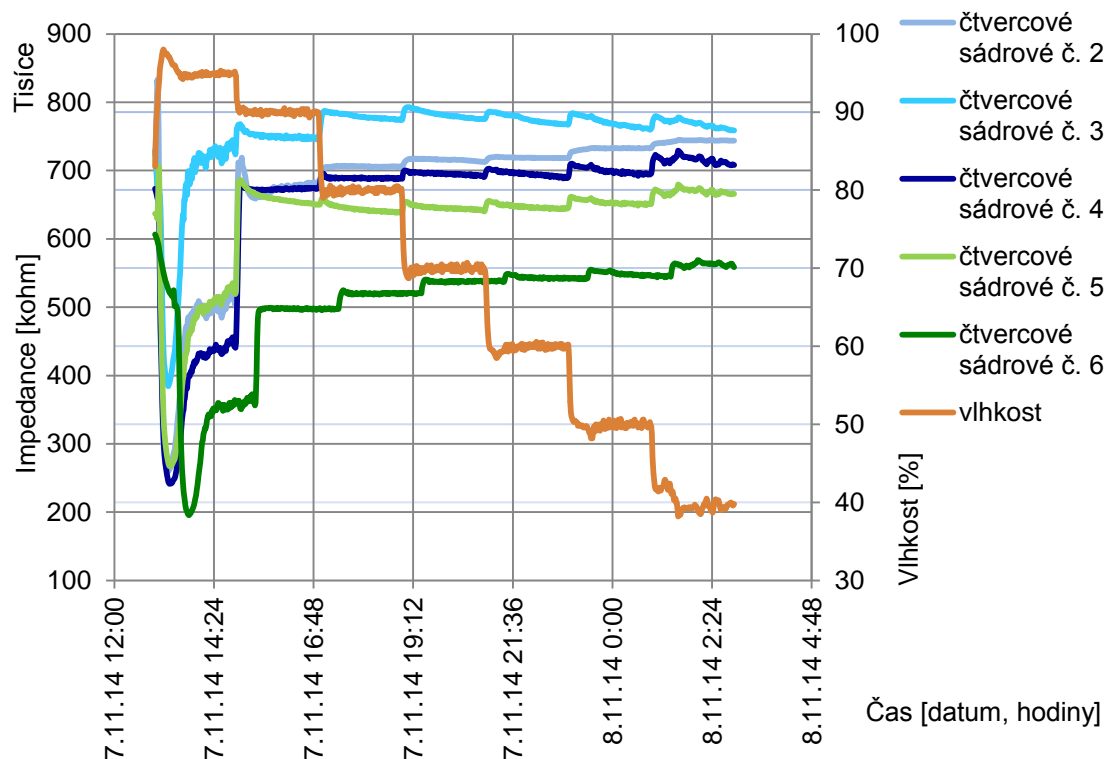
Obrázek D.5 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 0°C



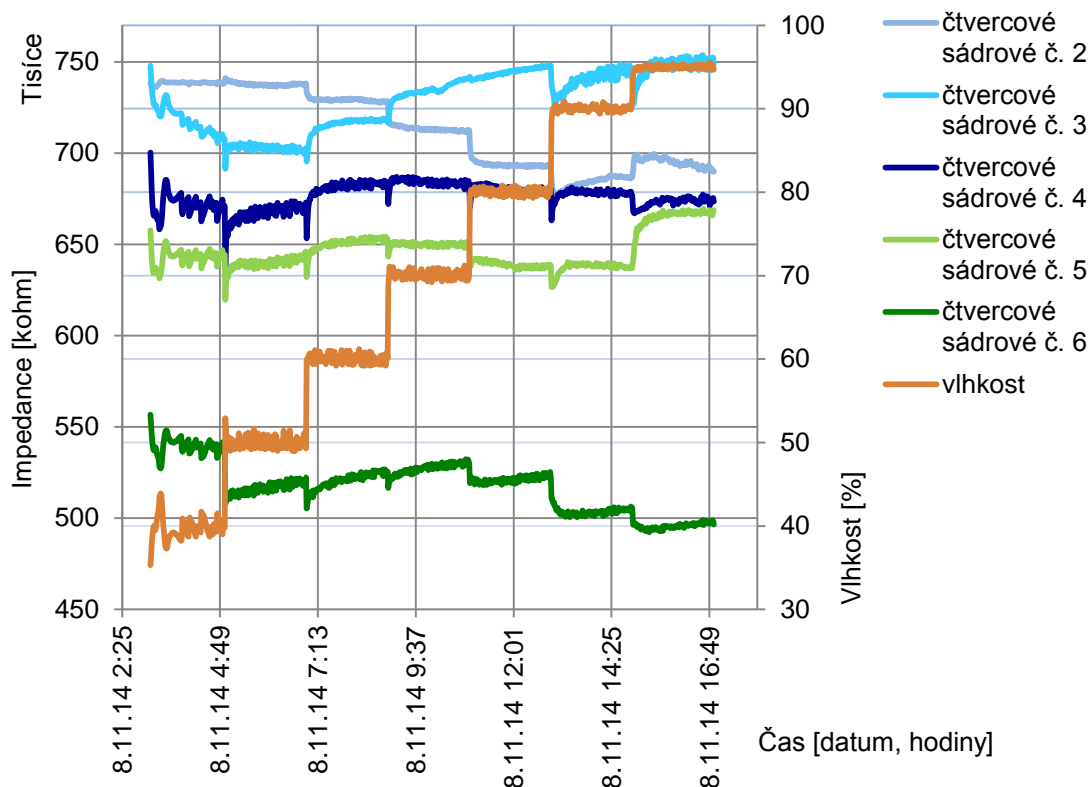
Obrázek D.6 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě -10°C



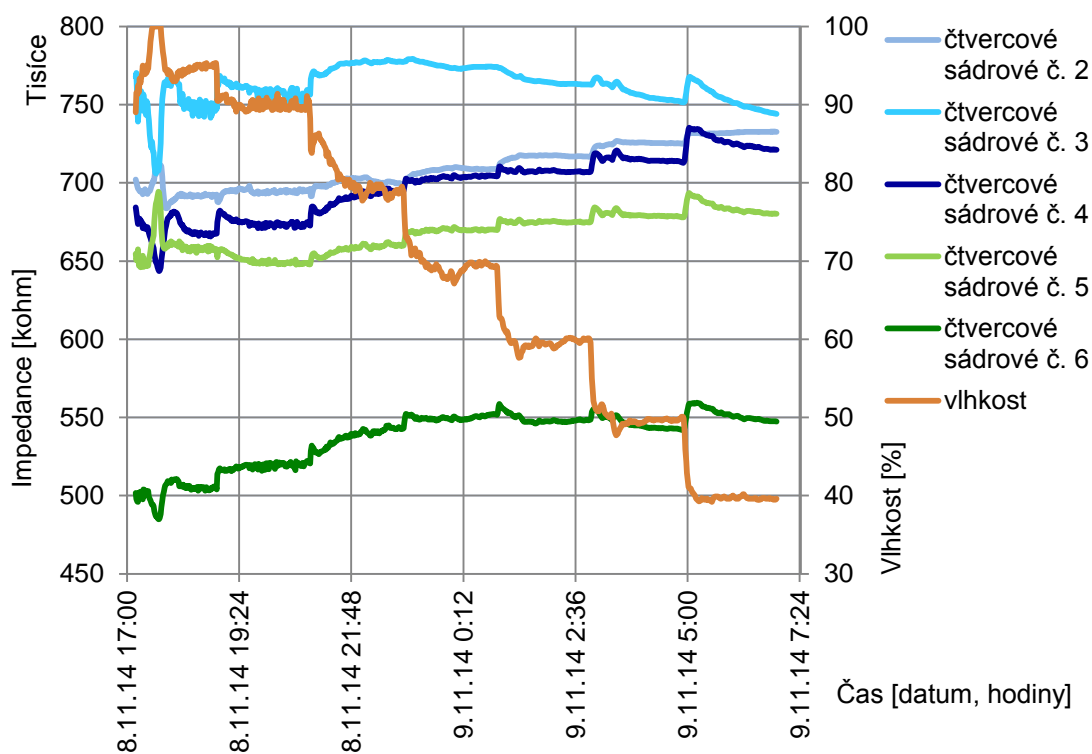
Obrázek D.7 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě -20°C



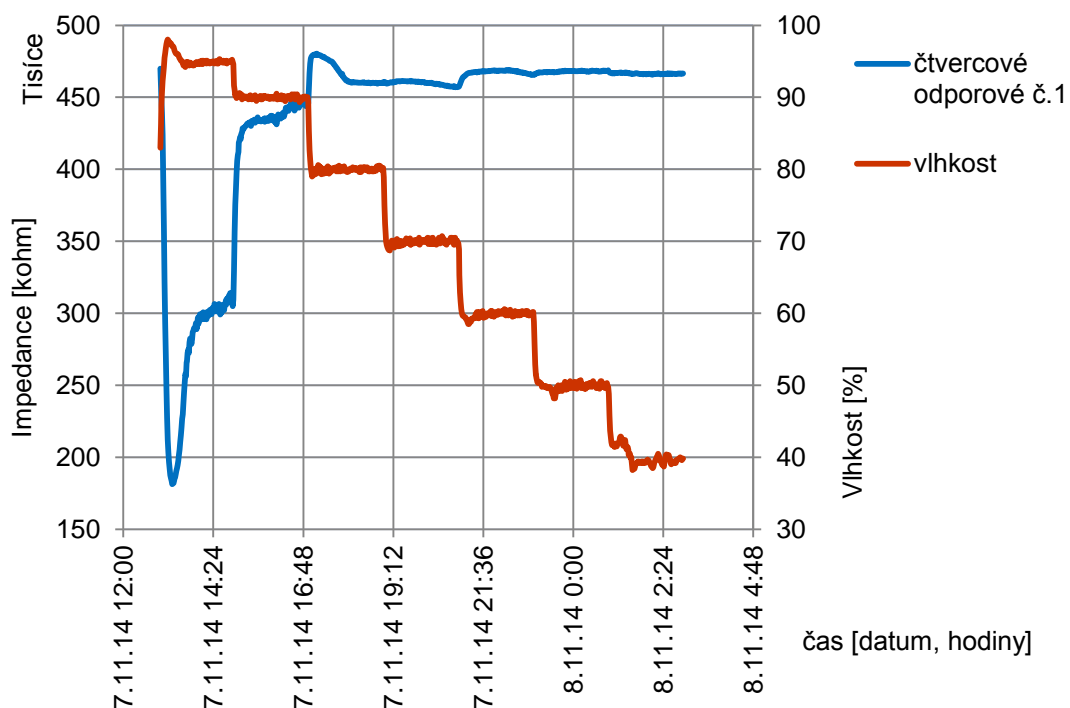
Obrázek D.8 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 30°C



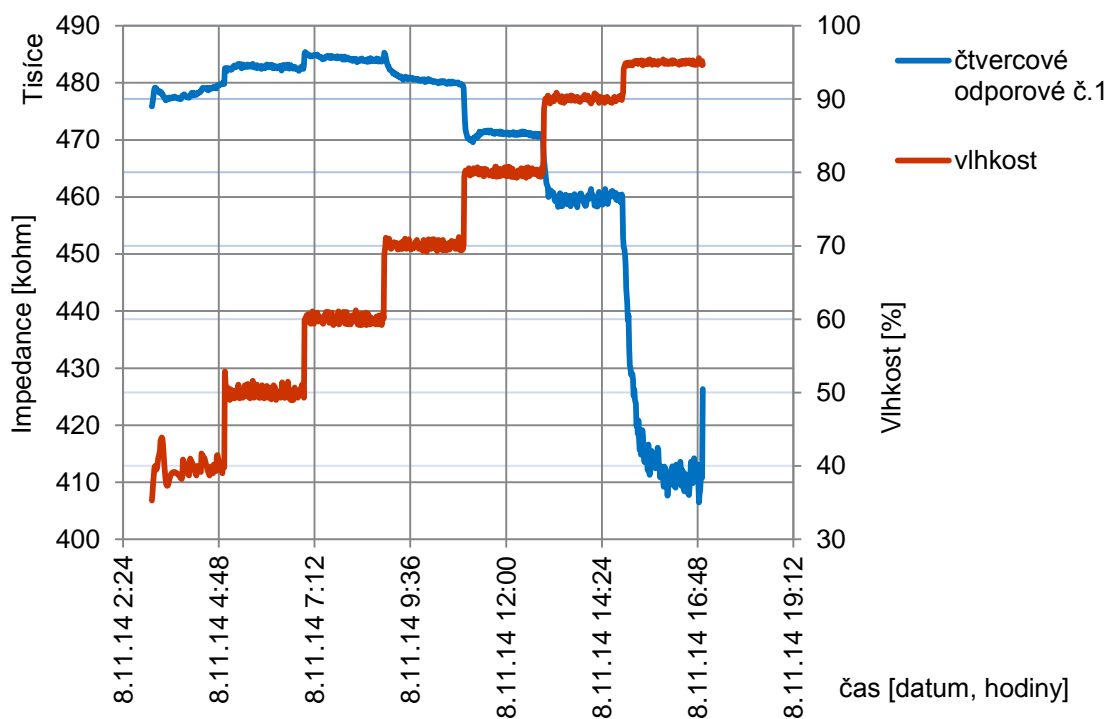
Obrázek D.9 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 20°C



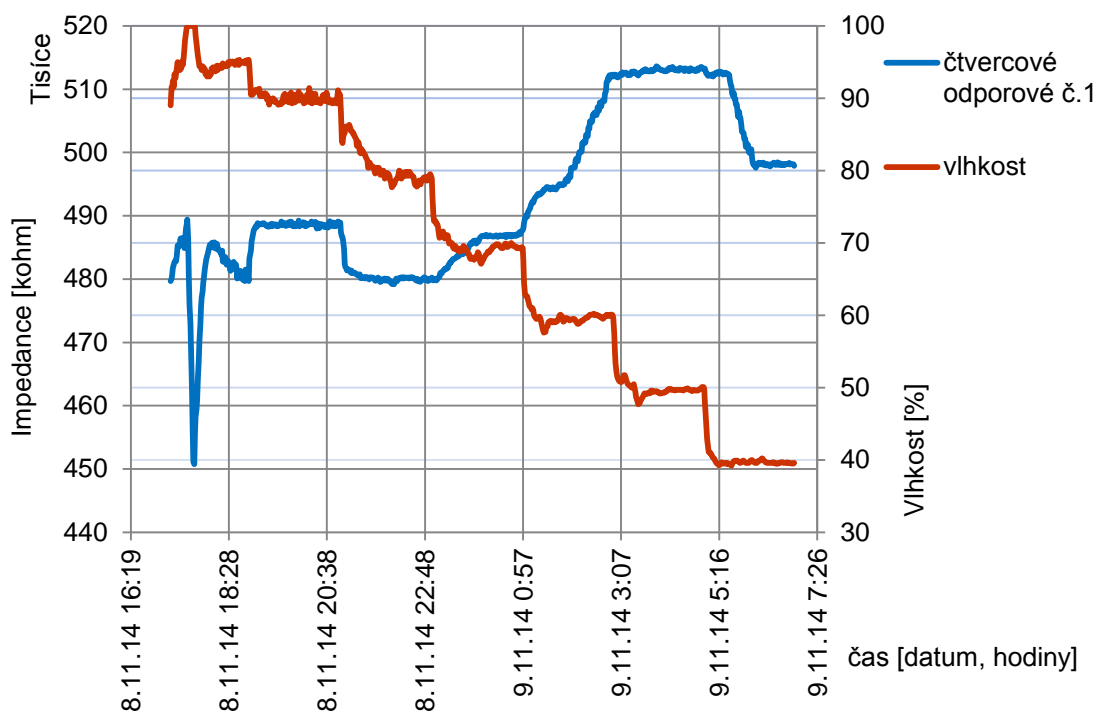
Obrázek D.10 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 10°C



Obrázek D.11 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 30°C a průchodu střídavého el. proudu

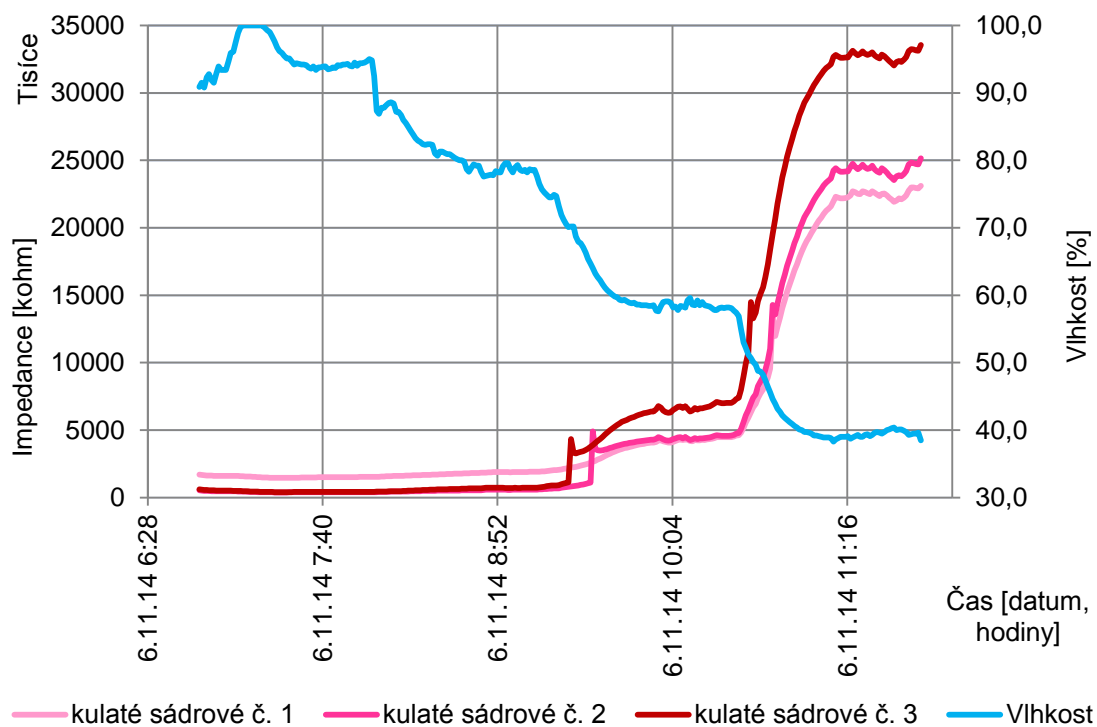


Obrázek D.12 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 20°C a průchodu střídavého el. proudu



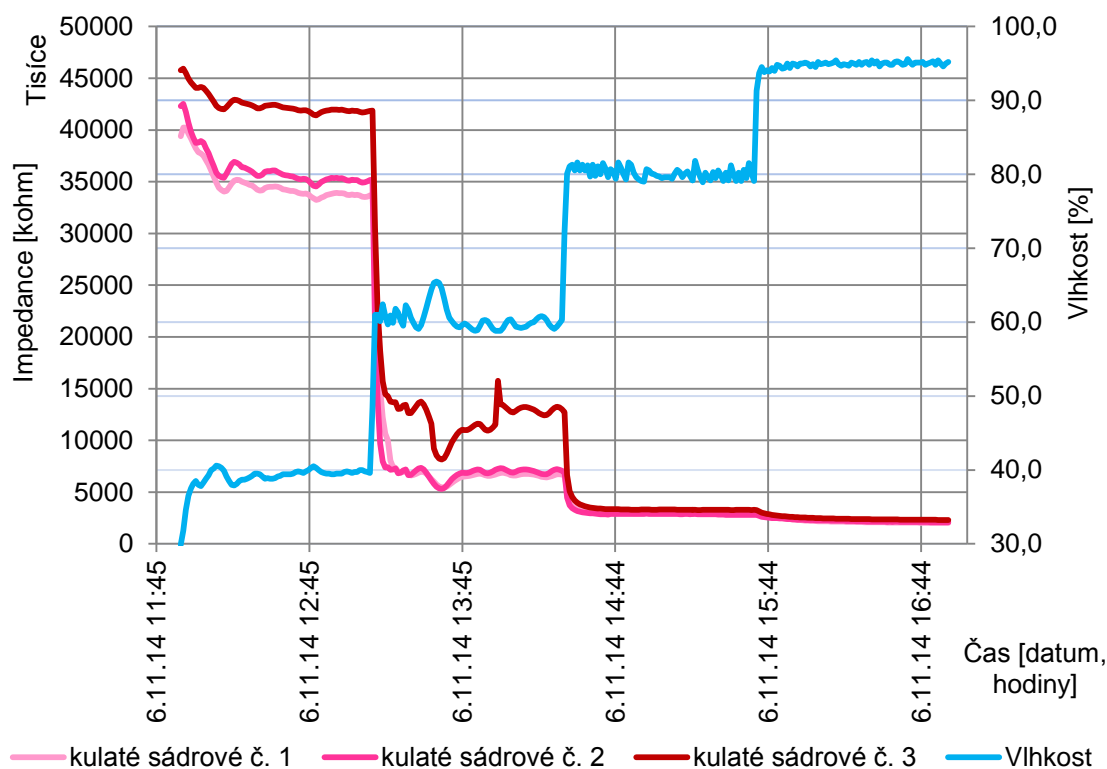
Obrázek D.13 Změna el. impedance vzhledem ke změně vlhkosti vzduchu při teplotě 10°C a průchodu střídavého el. proudu

### Odporové kulaté dvou vodičové snímače

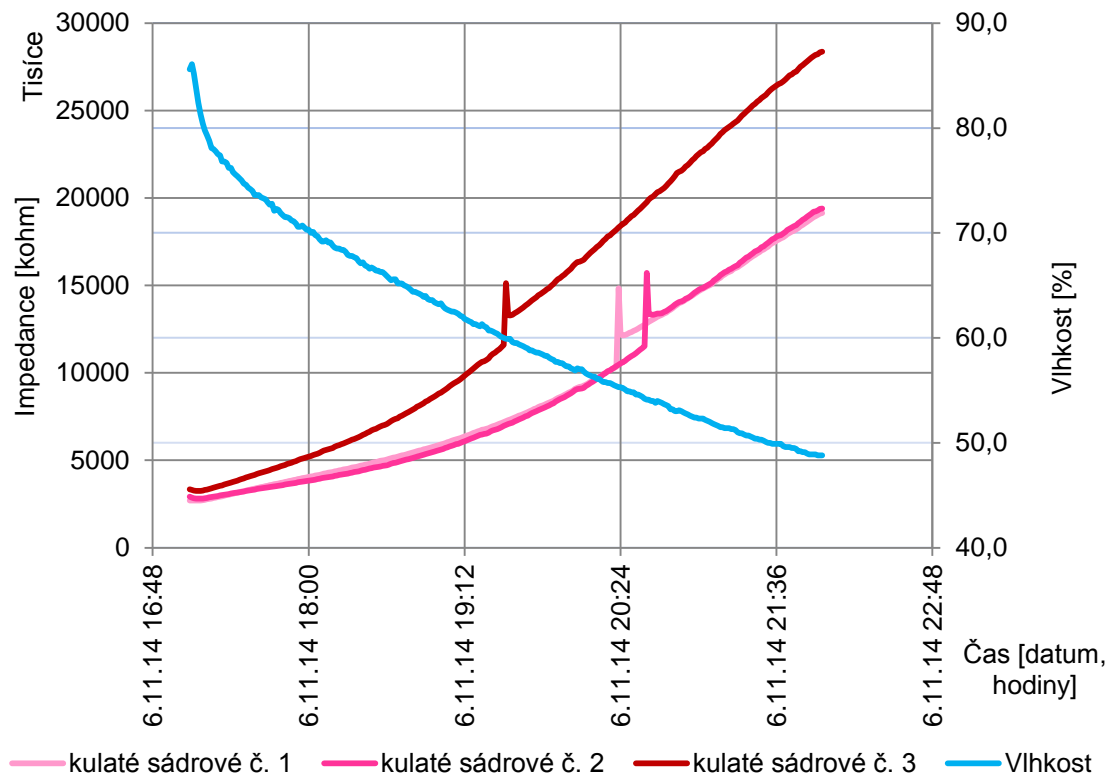


Obrázek D.14 Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě 20 °C

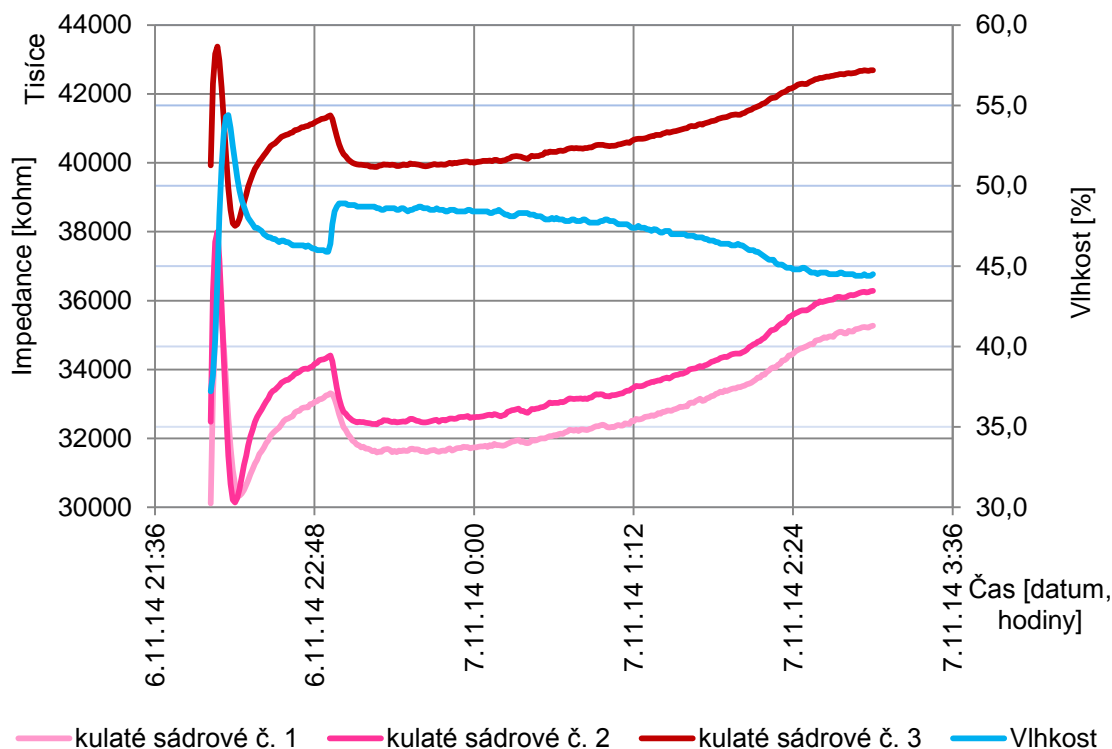




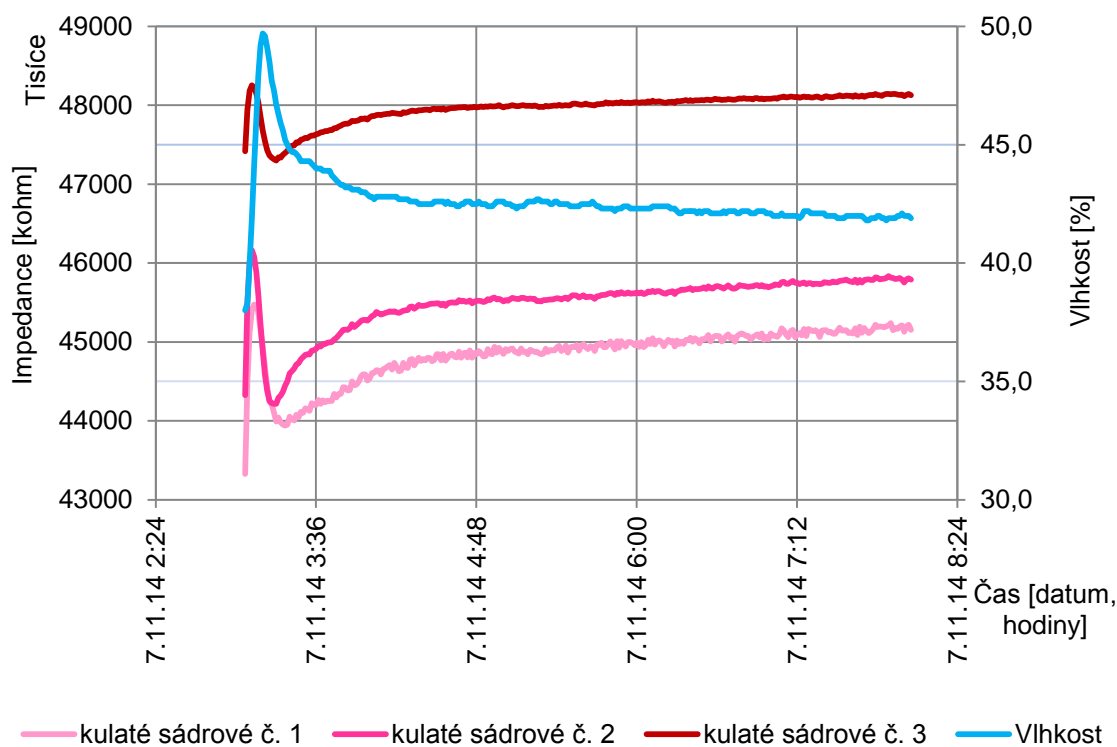
Obrázek D.15 Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě 10 °C



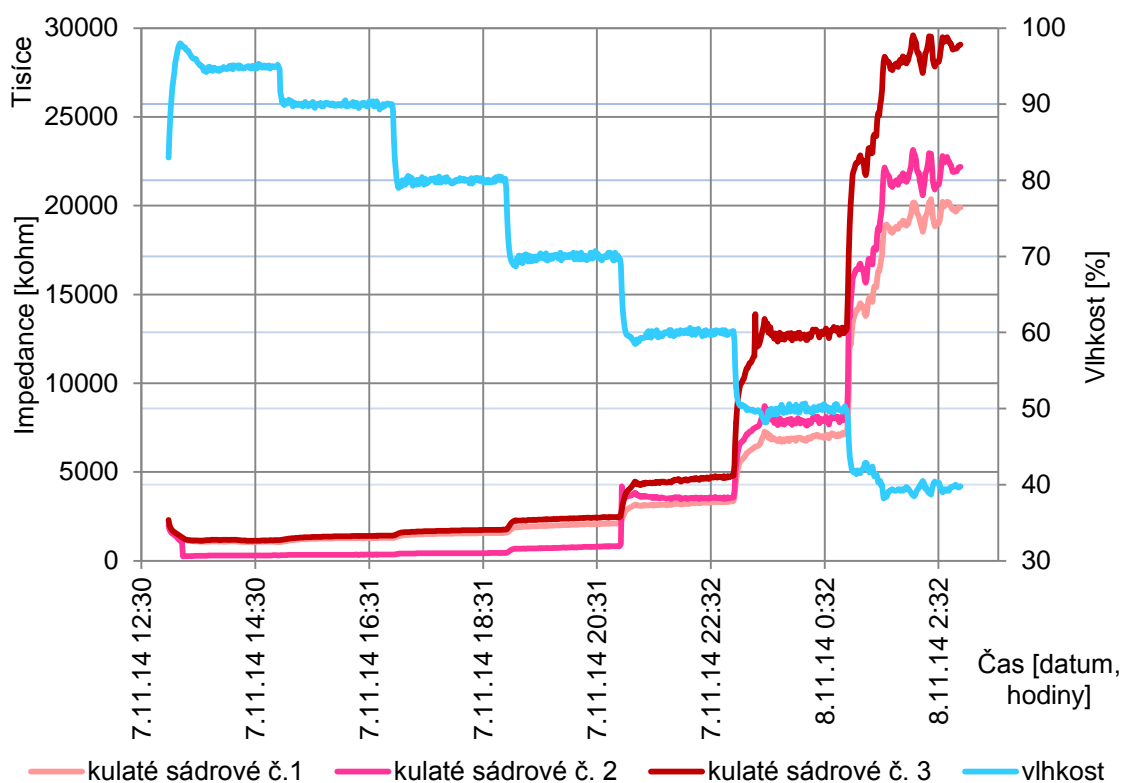
Obrázek D.16 Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě 0 °C



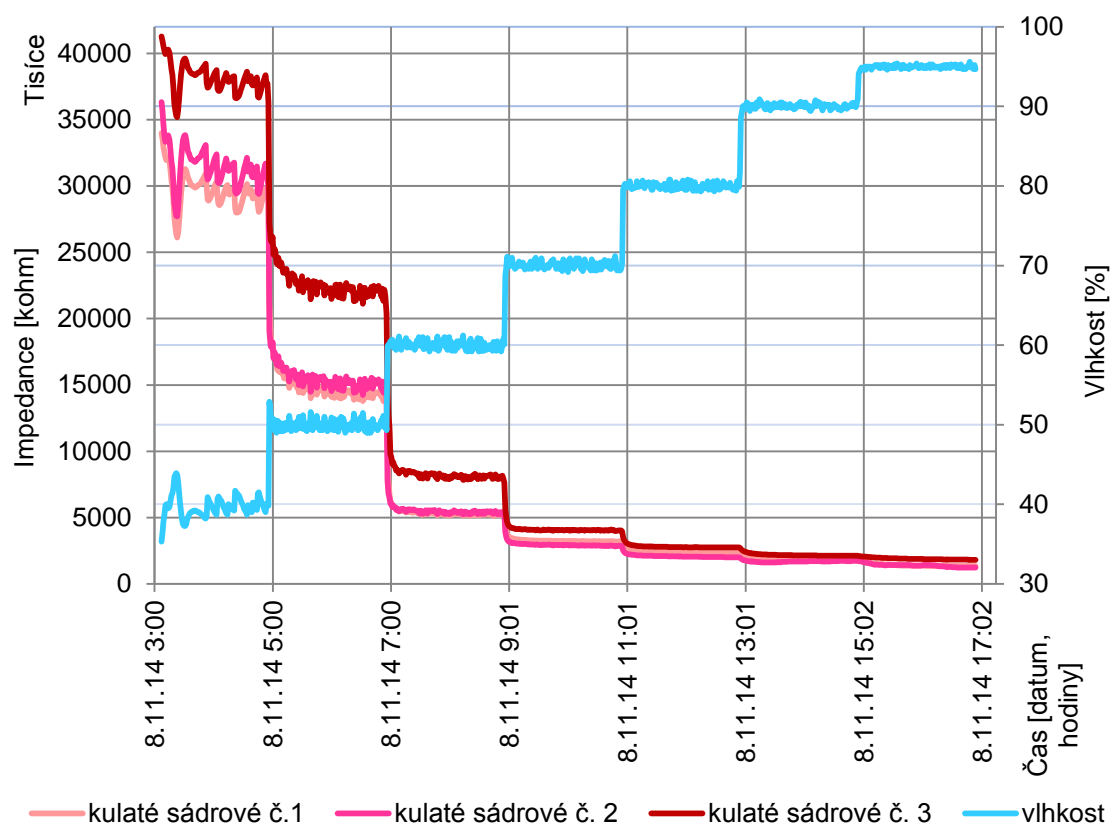
Obrázek D.17 Průběh el. impedance odporových kulatých dvouvodičových snímačů při teplotě -10 °C



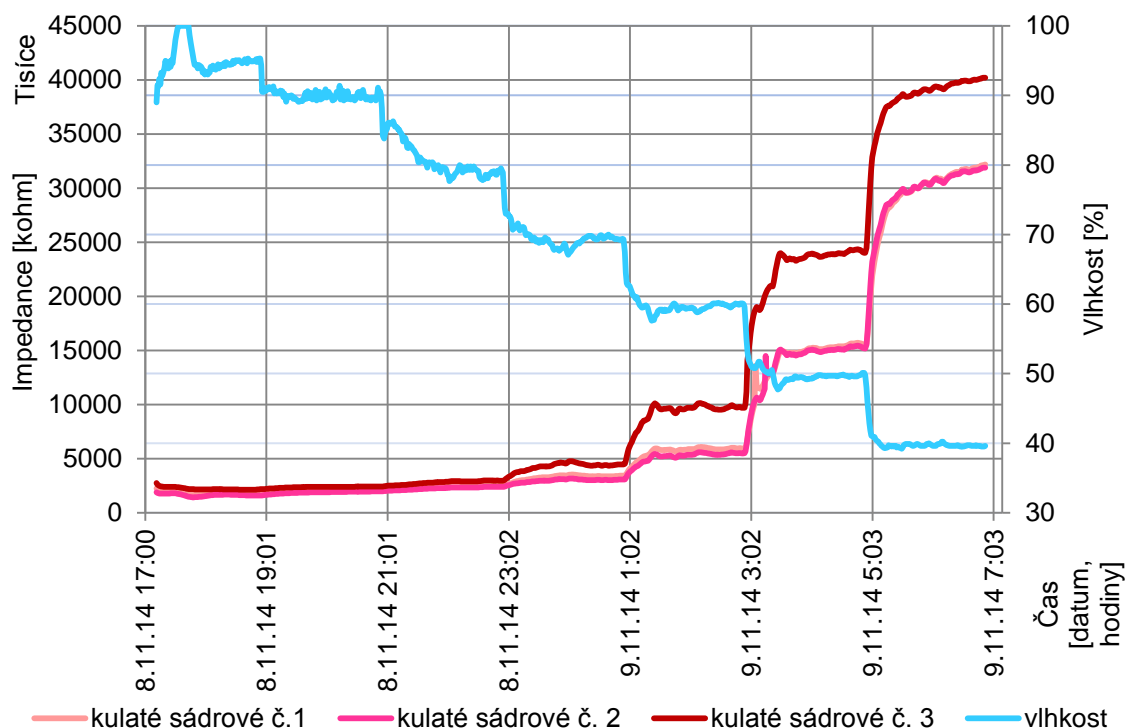
Obrázek D.18 Průběh el. impedance odporových kulatých dvouvodičových snímačů při teplotě -20 °C



Obrázek D.19 Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě 30 °C

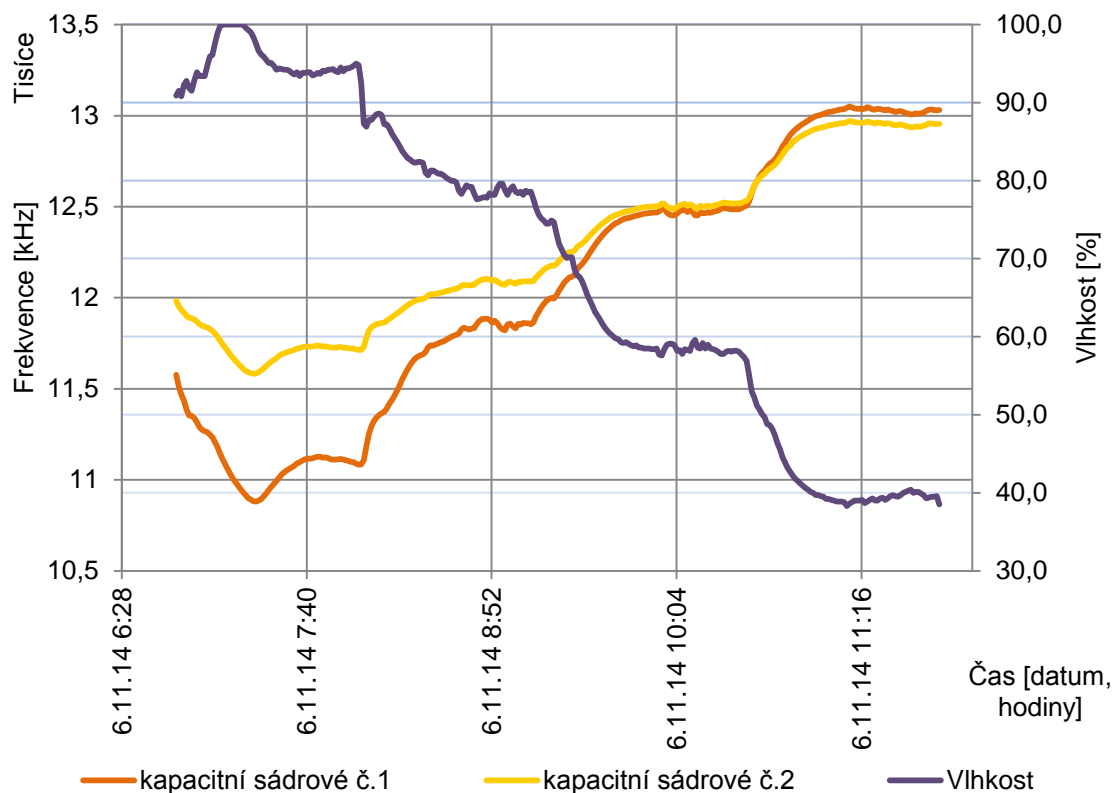


Obrázek D.20 Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě 20 °C

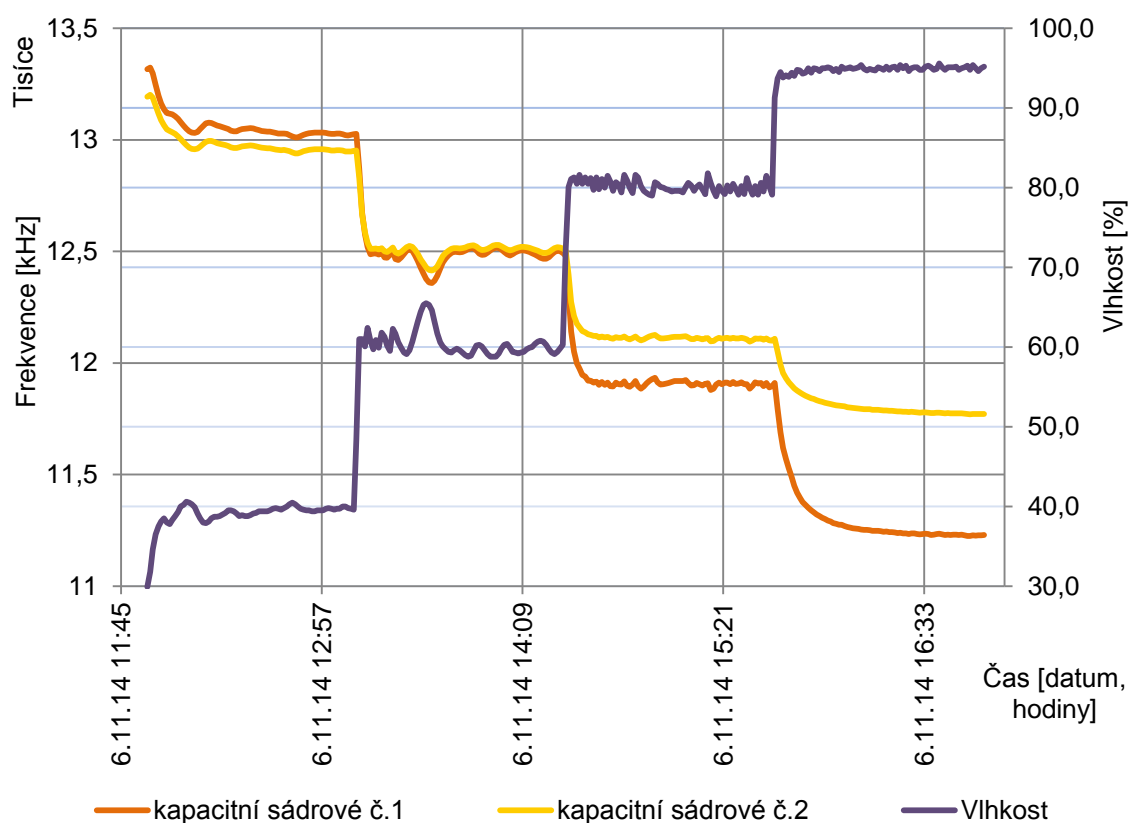


Obrázek D.21 Průběh el. impedance odporových kulatých dvou vodičových snímačů při teplotě 10 °C

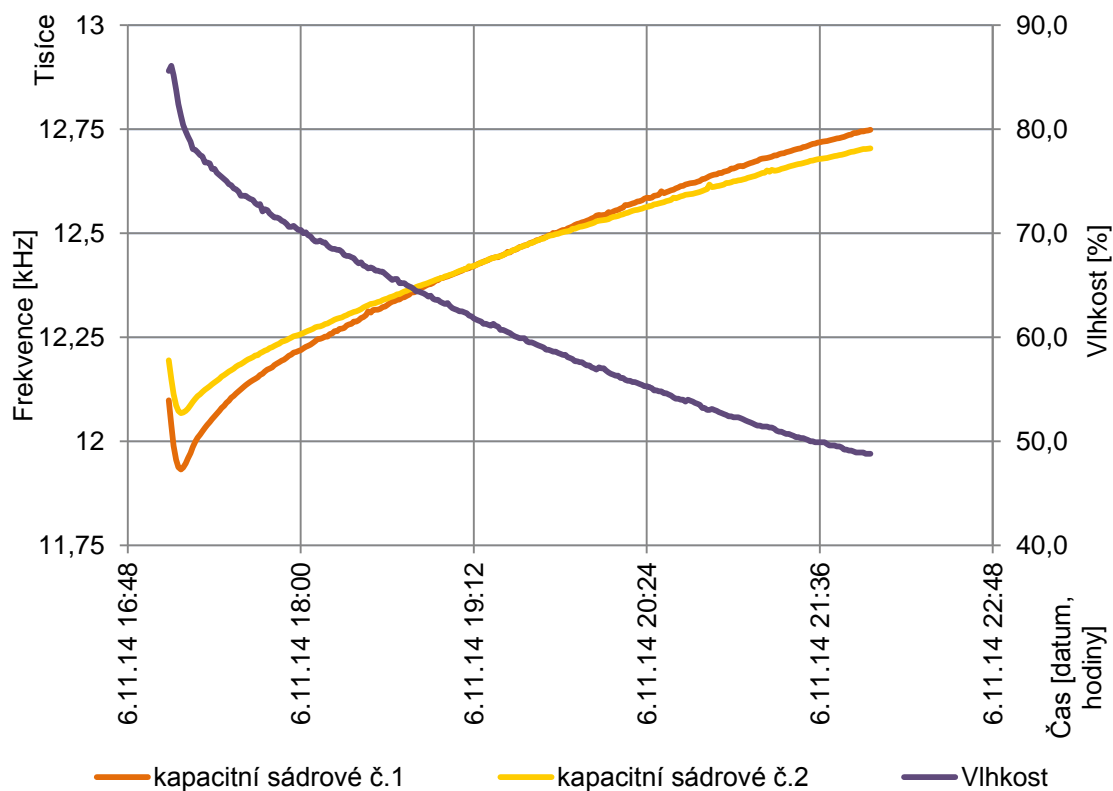
### Kapacitní kulaté snímače



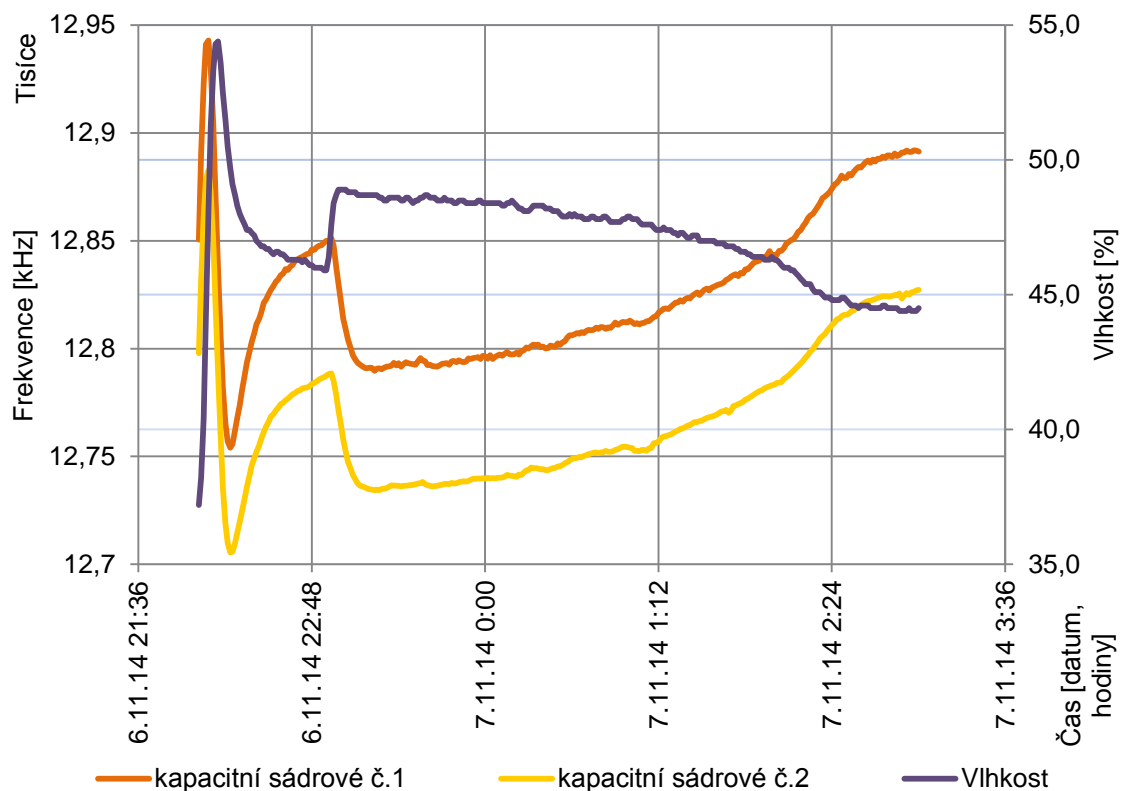
Obrázek D.22 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 20 °C



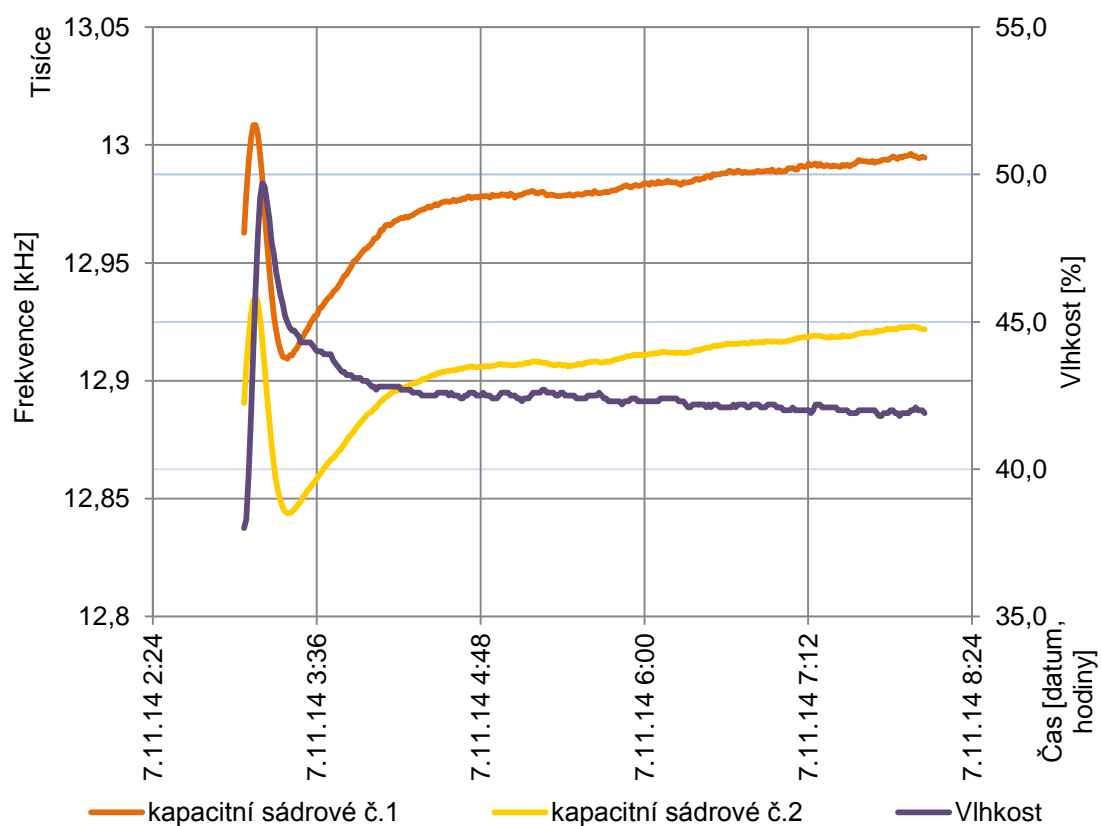
Obrázek D.23 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 10 °C



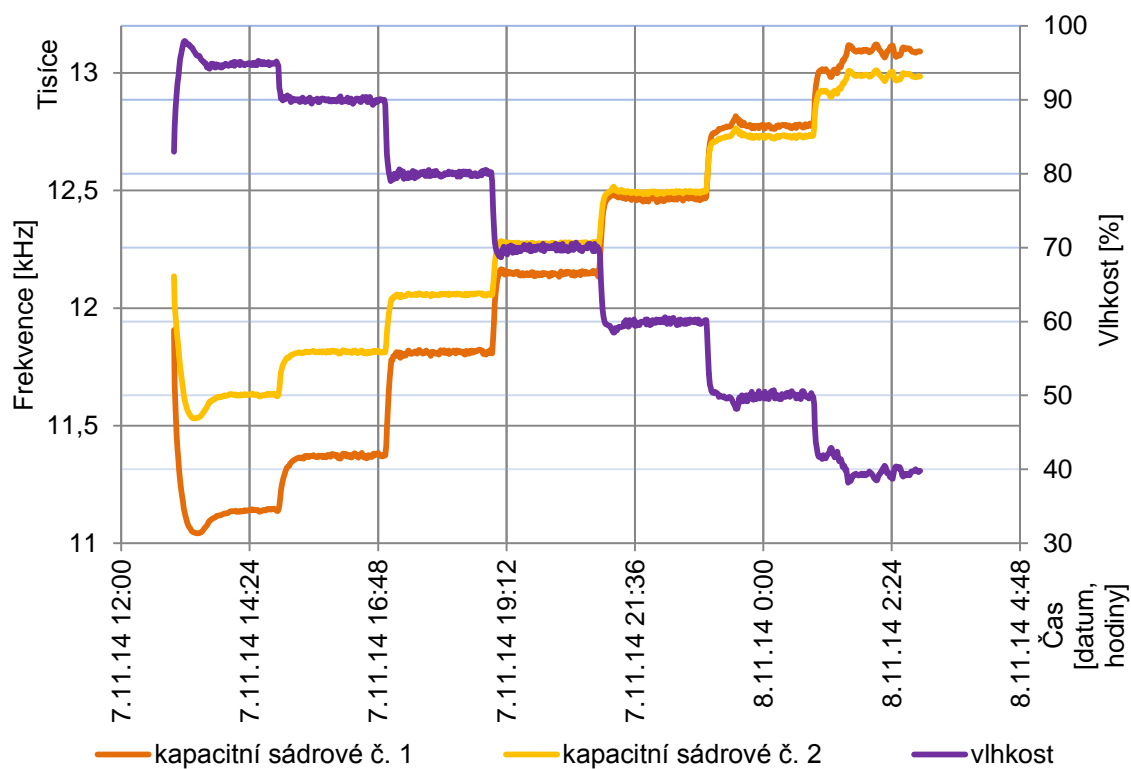
Obrázek D.24 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 0 °C



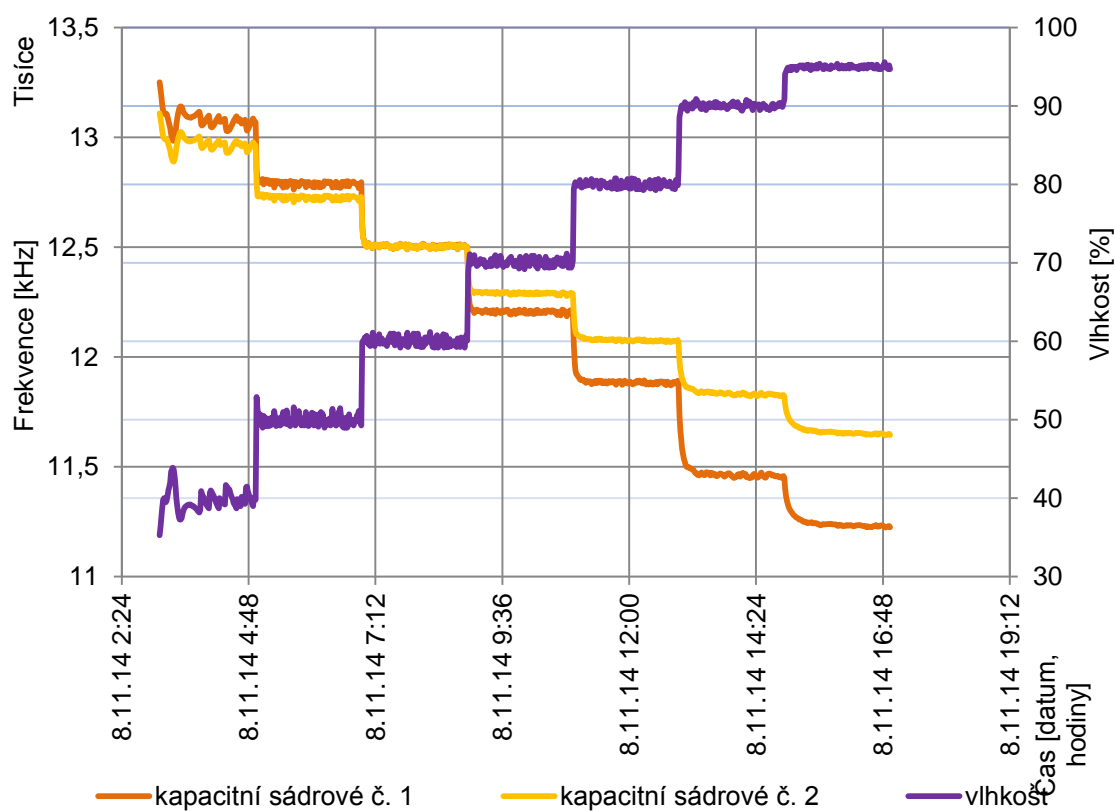
Obrázek D.25 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě -10 °C



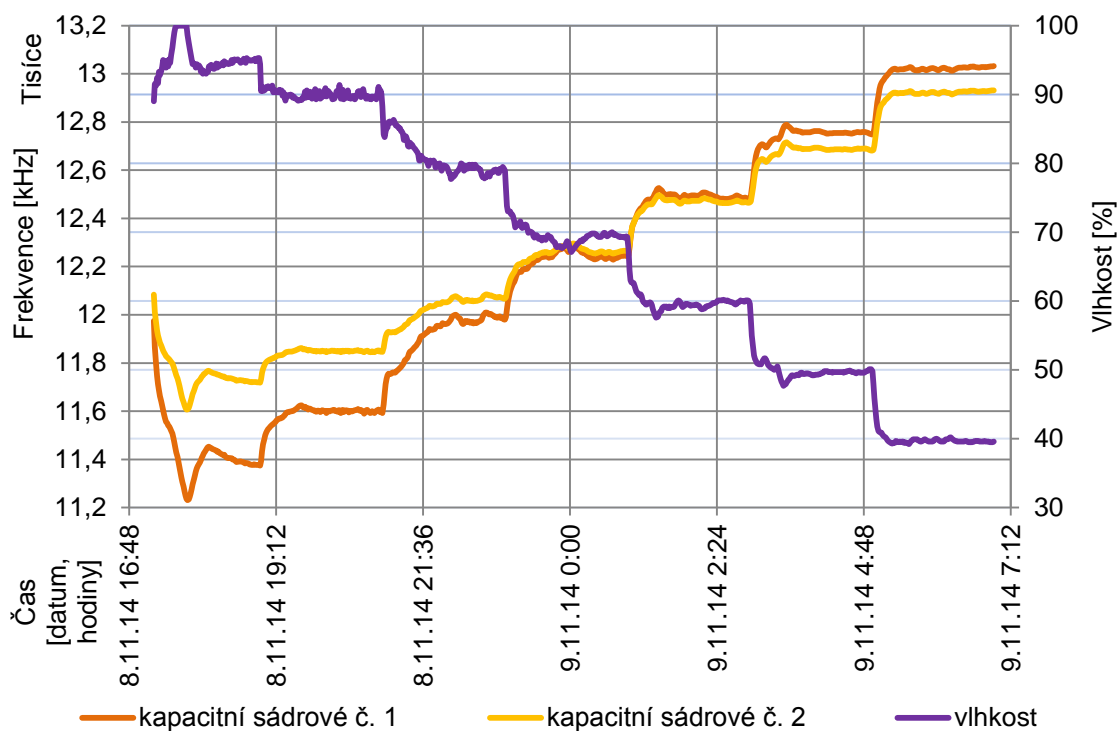
Obrázek D.26 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě -20 °C



Obrázek D.27 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 30 °C

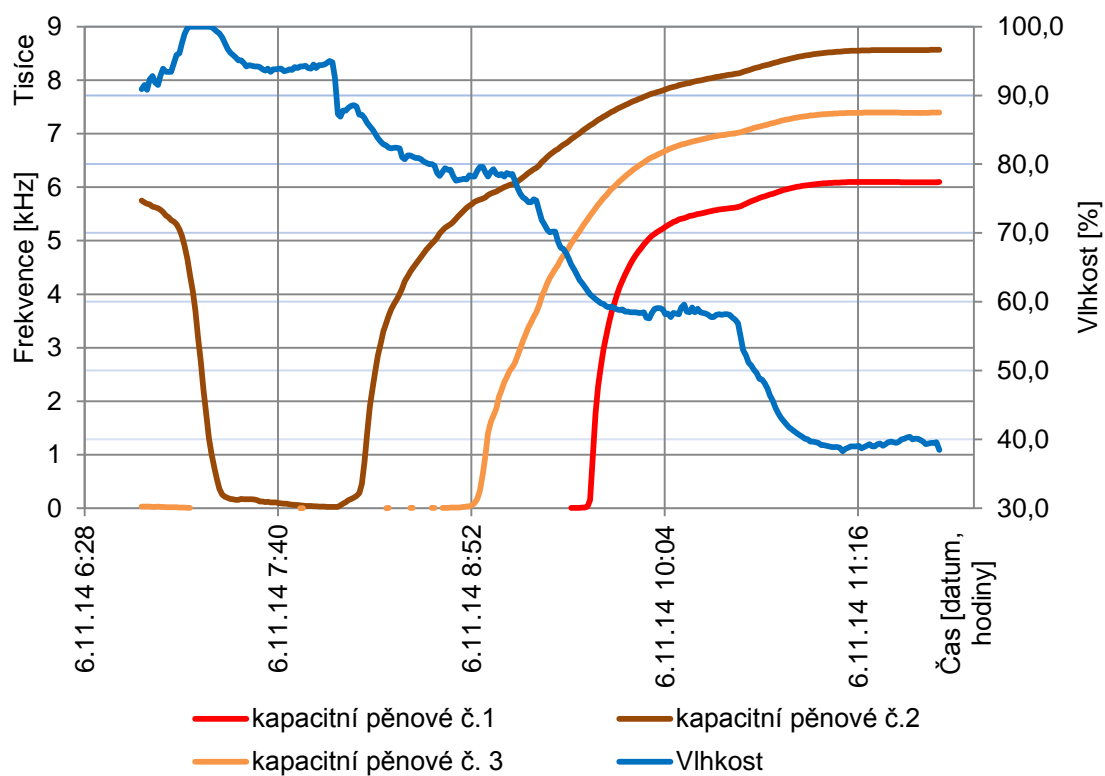


Obrázek D.28 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 20 °C



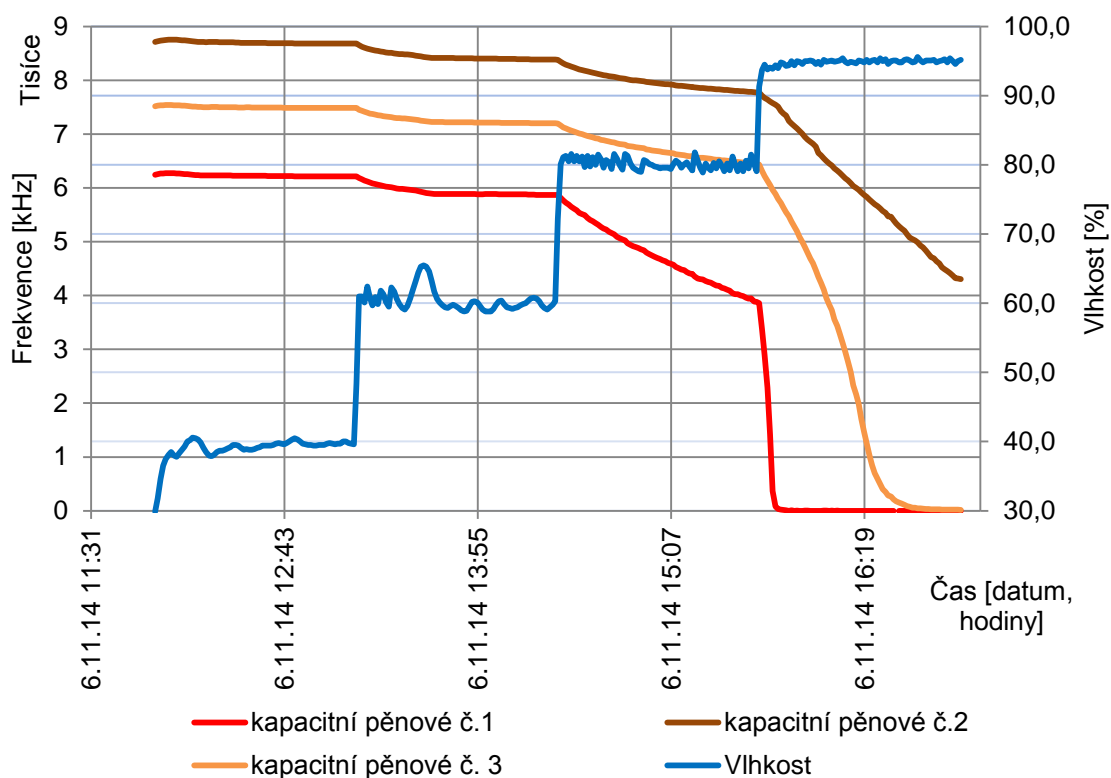
Obrázek D.29 Průběh frekvence kapacitních kulatých snímačů při teplotě 10 °C

### Kapacitní pěnové snímače čtvercového tvaru

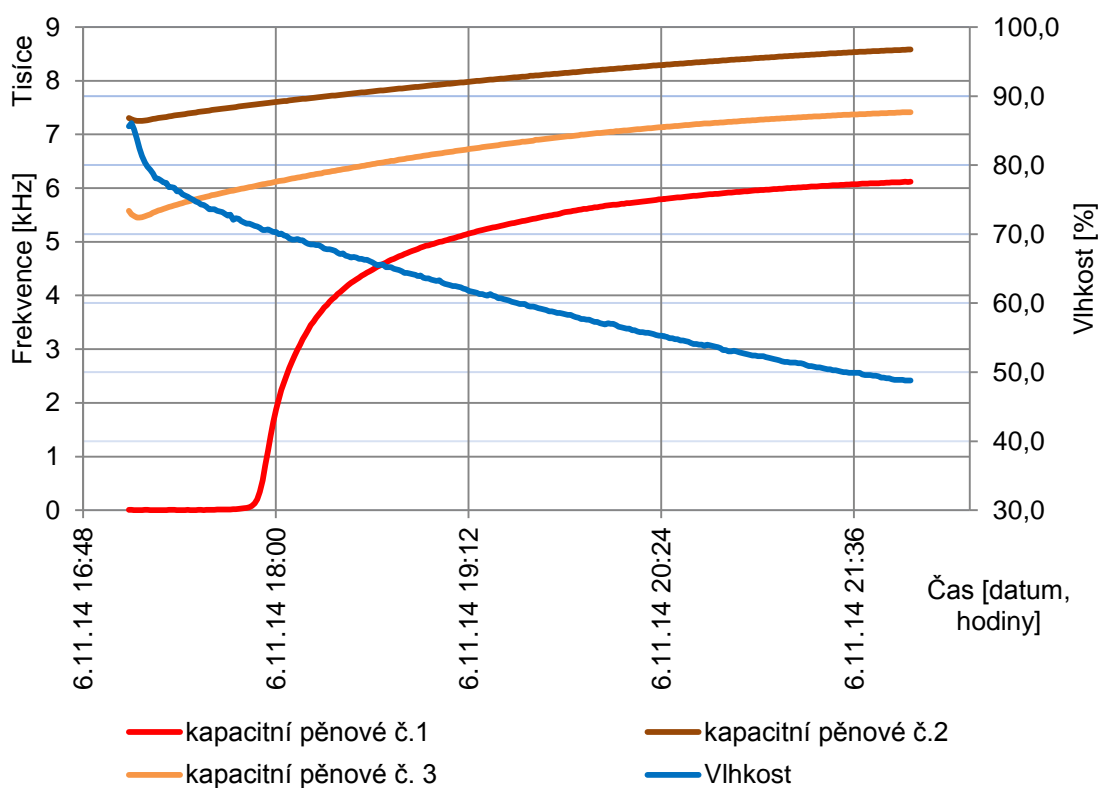


Obrázek D.30 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 20 °C

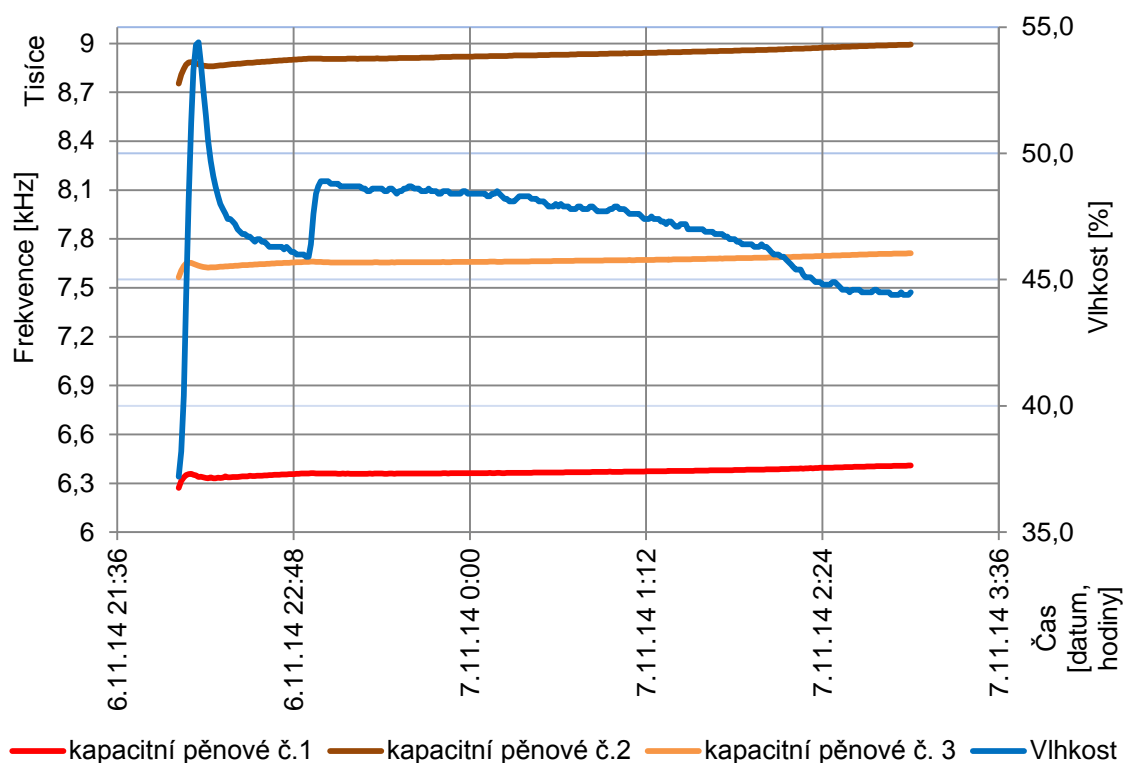




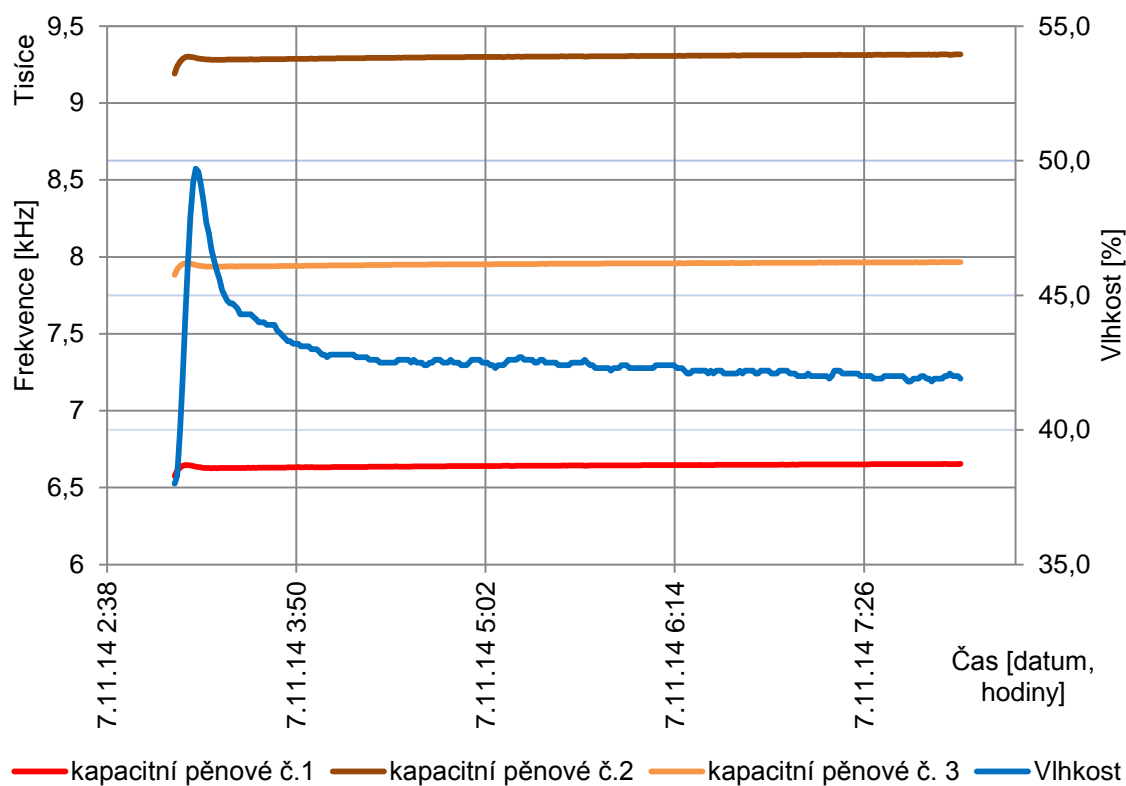
Obrázek D.31 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 10 °C



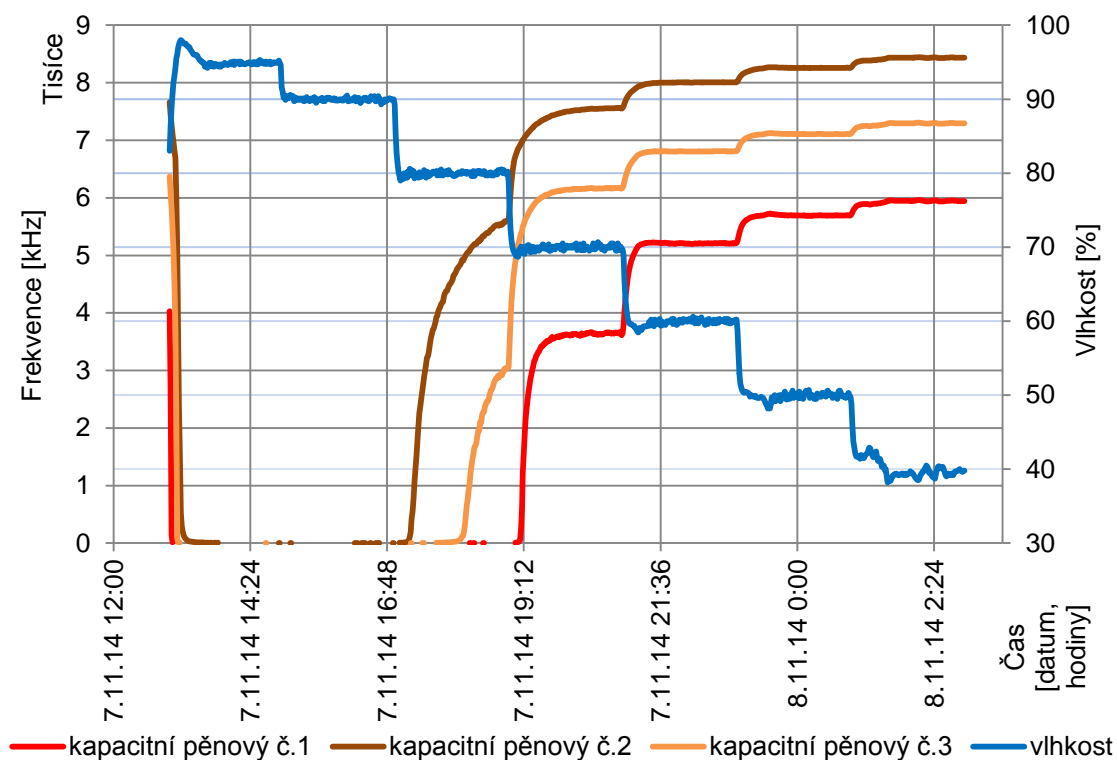
Obrázek D.32 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 0 °C



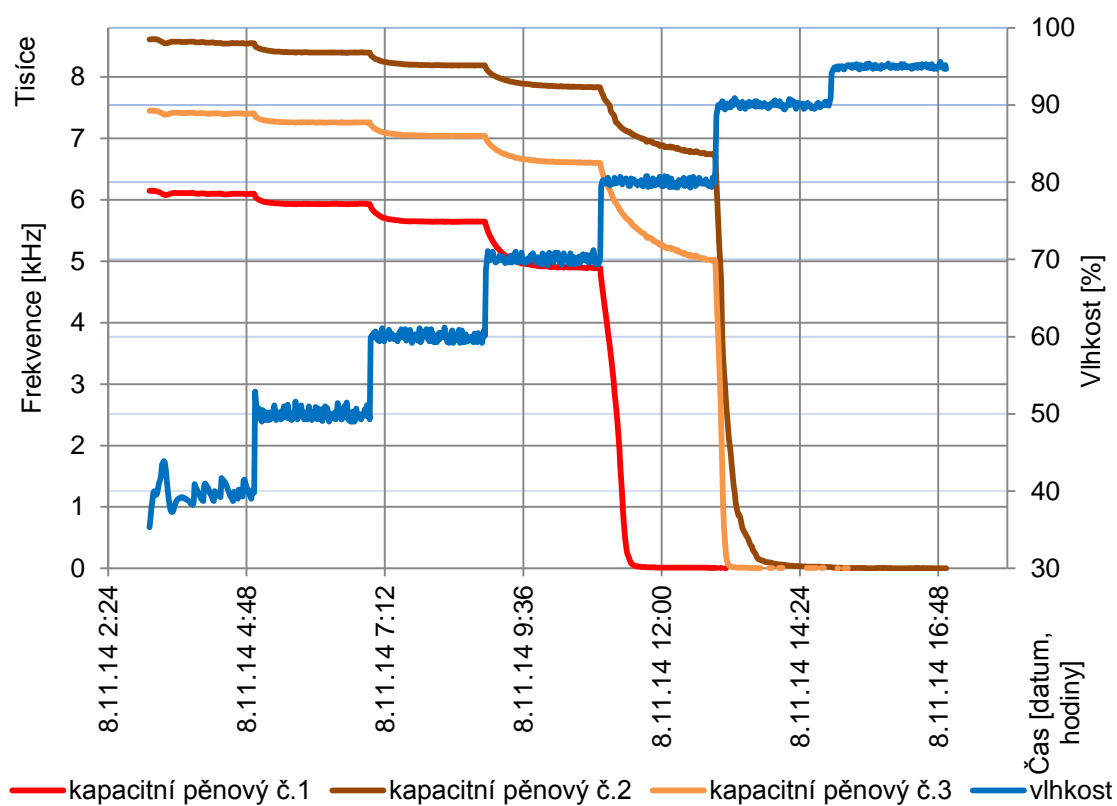
Obrázek D.33 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě -10 °C



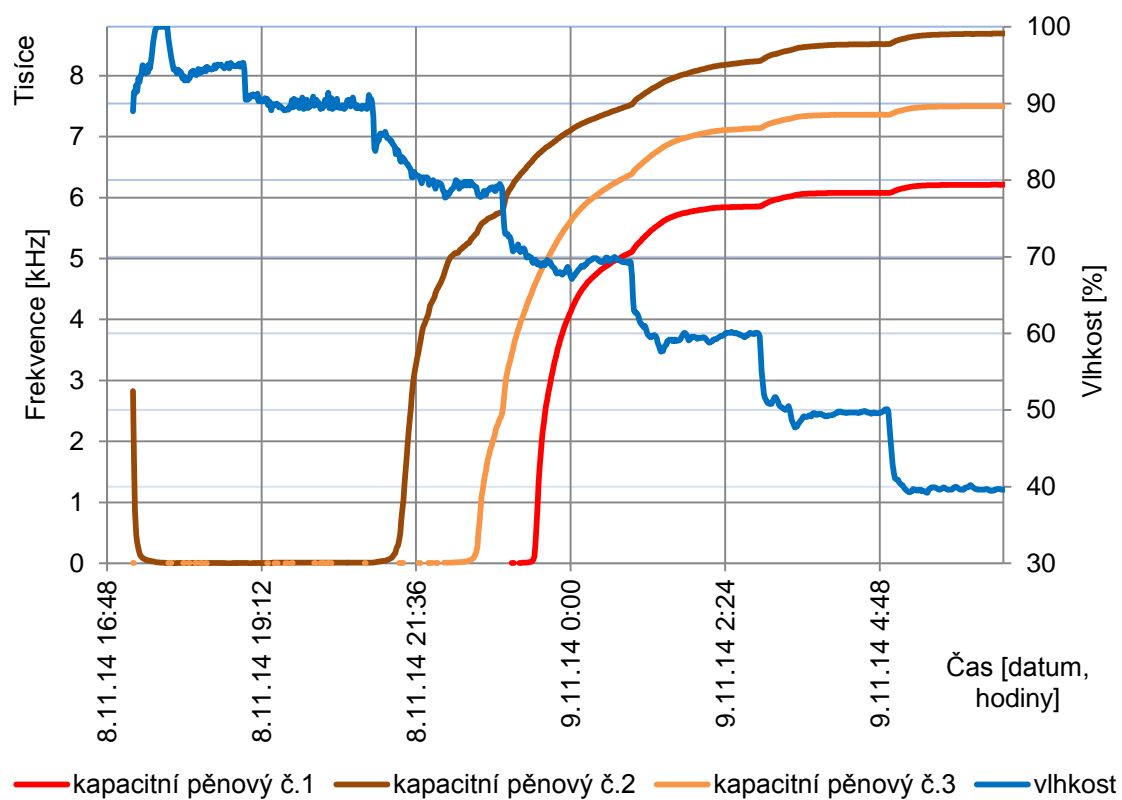
Obrázek D.34 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě -20 °C



Obrázek D.35 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 30 °C



Obrázek D.36 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 20 °C



Obrázek D.37 Průběh frekvence kapacitních pěnových snímačů čtvercového tvaru při teplotě 10 °C

## E FOTODOKUMENTACE VÝROBY ZJEDNODUŠENÉHO MODELU KONSTRUKCE JEDNOPLÁŠŤOVÉ PLOCHÉ STŘECHY



Obrázek E.1 Rozměření podpůrné konstrukce z pěnového polystyrénu

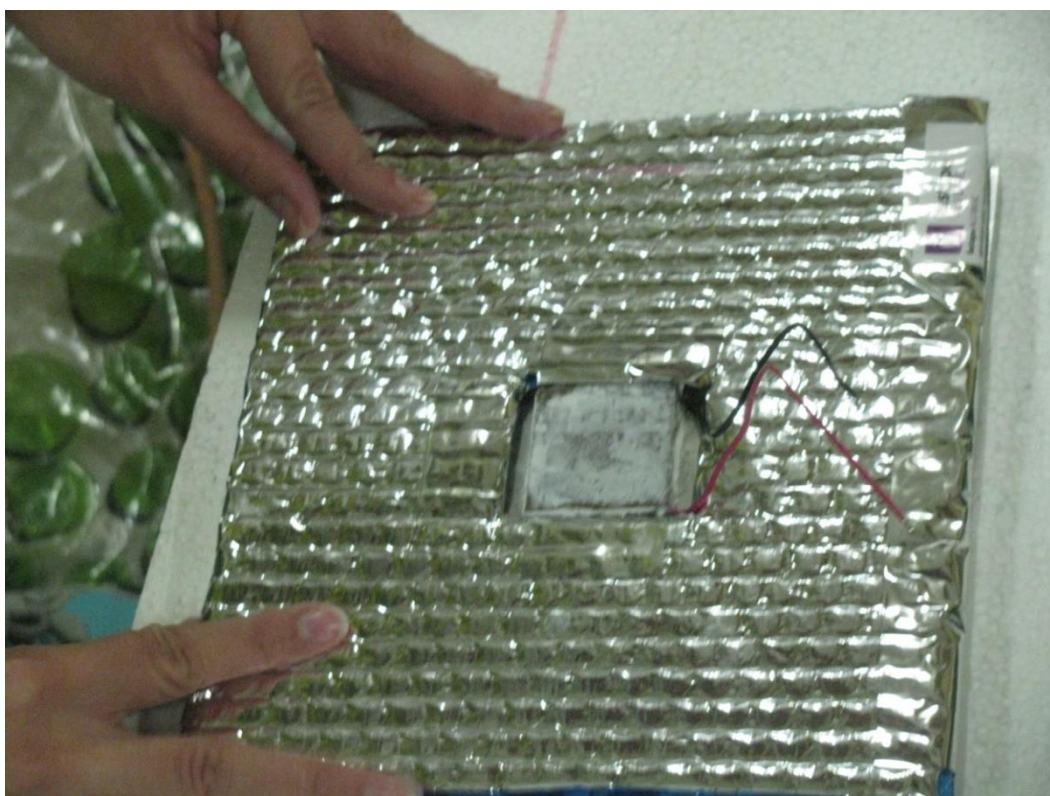


Obrázek E.2 Řezání podpůrné konstrukce

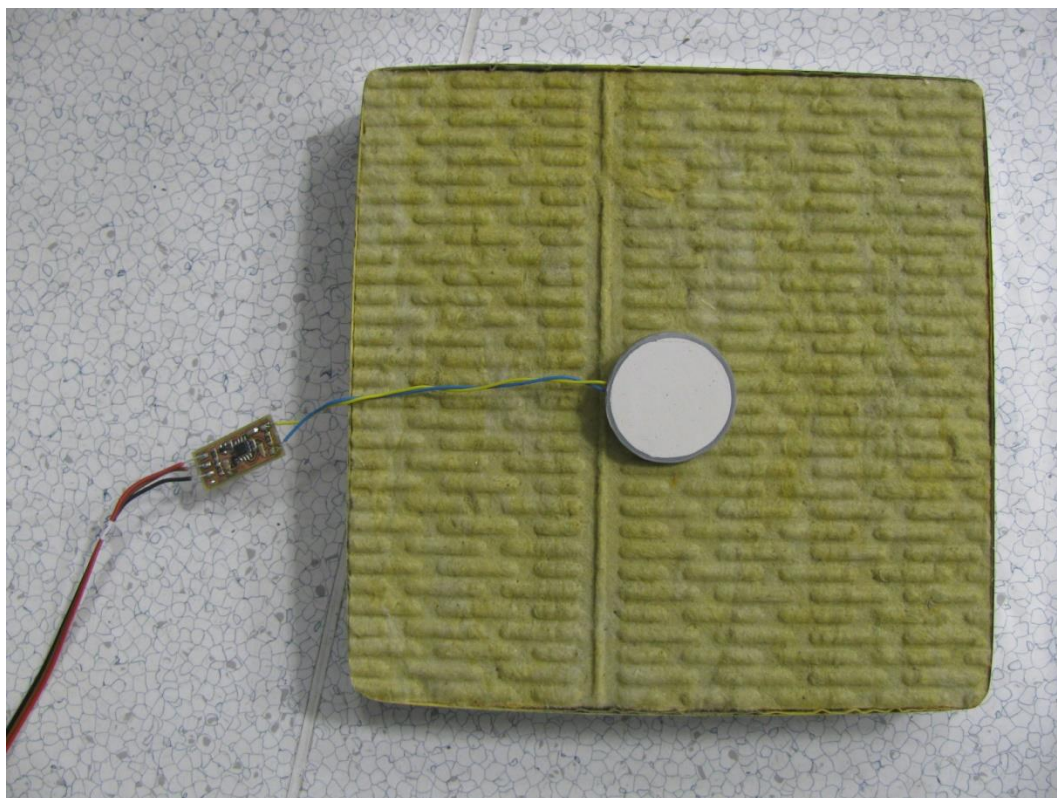




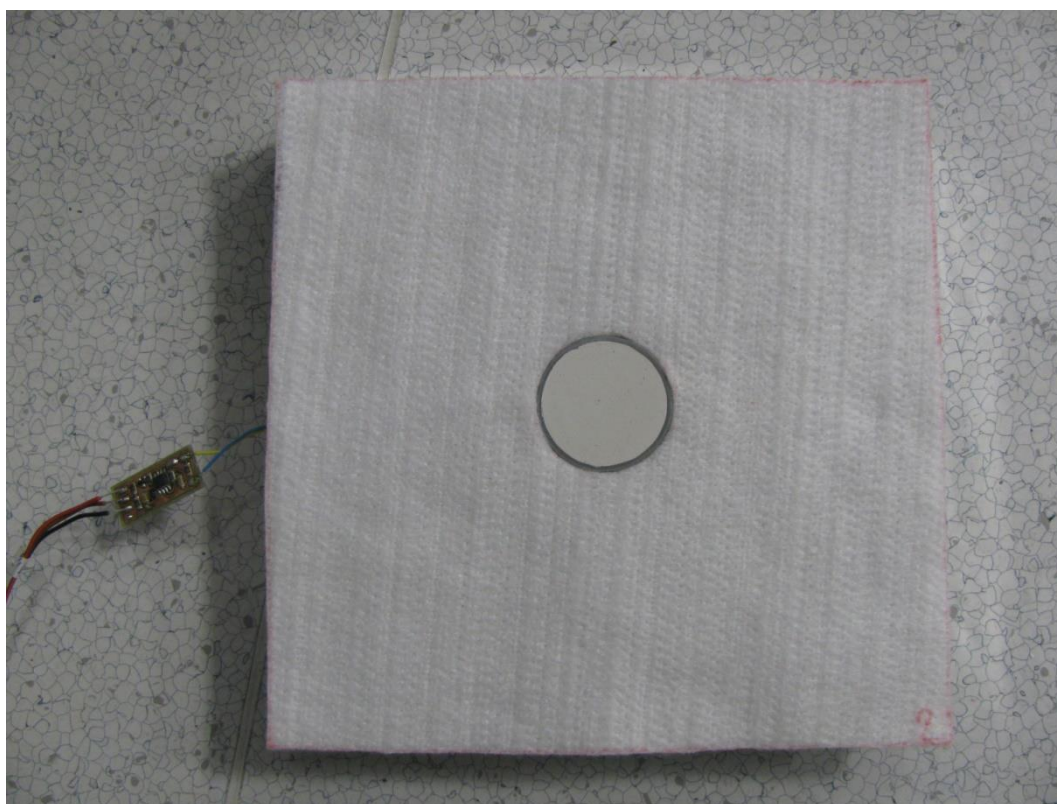
Obrázek E.3 Řezání hydroizolační fólie DEKPLAN



Obrázek E.4 Izolování horní strany hliníkové desky reflexní fólií

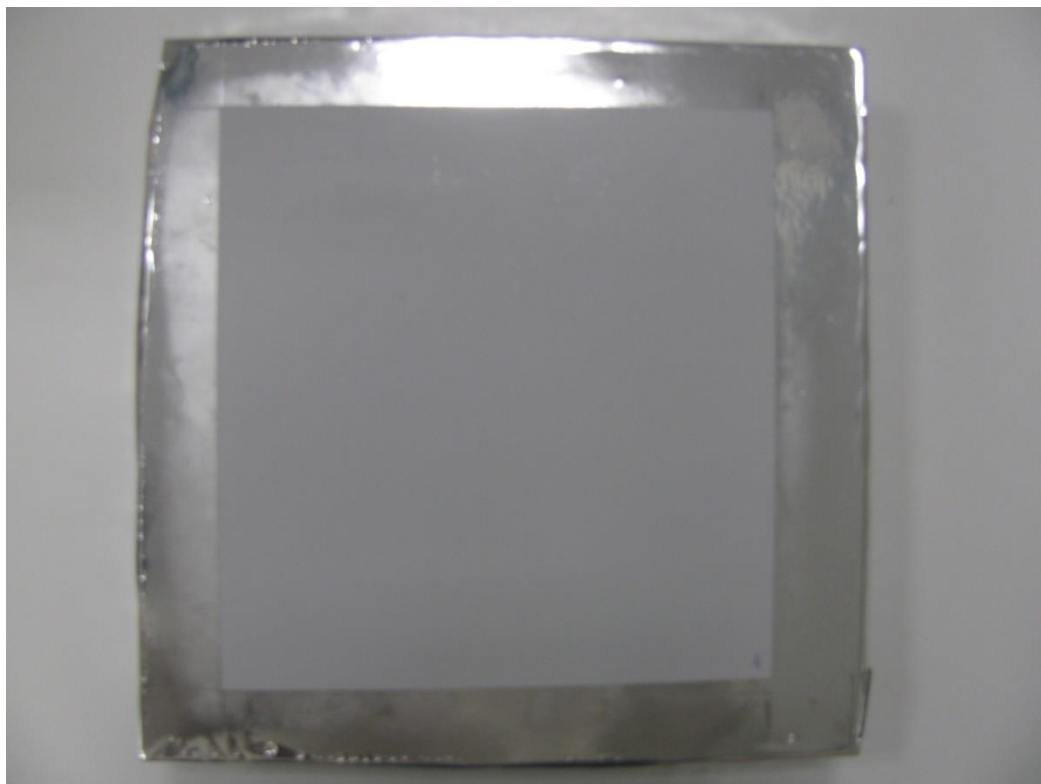


Obrázek E.5 Vyjímatelný čtverec ze skelně plsti s kapacitním senzorem

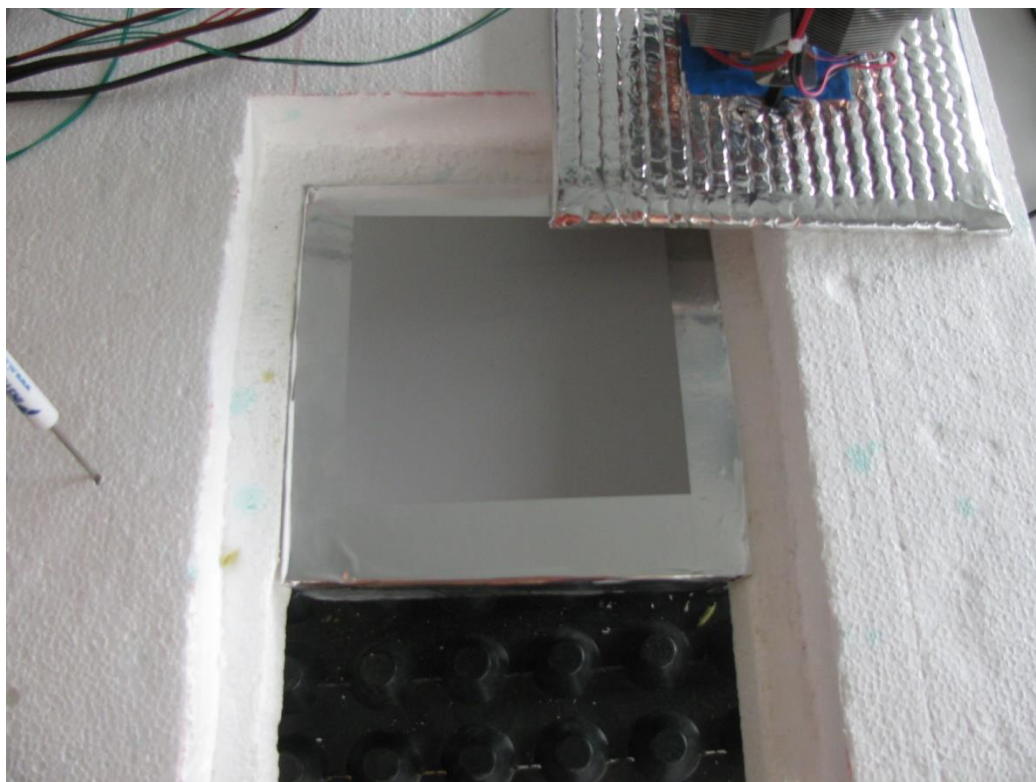


Obrázek E.6 Vyjímatelný čtverec s osazeným senzorem a geotextilií



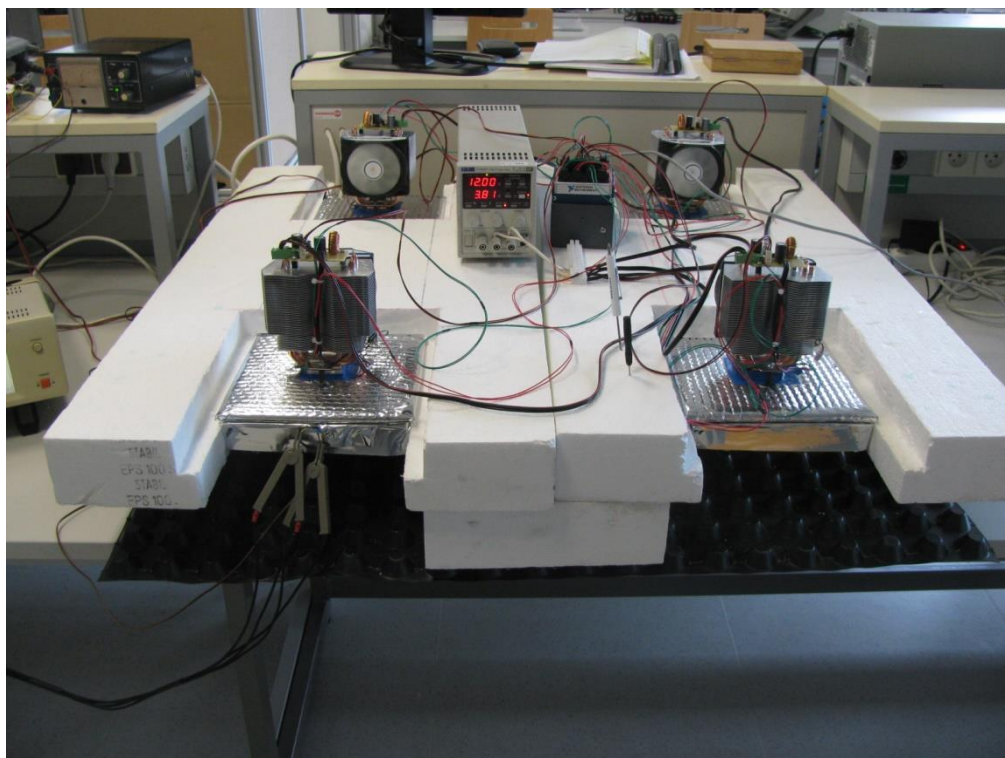


Obrázek E.7 Vyjímatelý čtverec s osazenou povlakovou hydroizolací a oblepený hliníkovou lepicí páskou

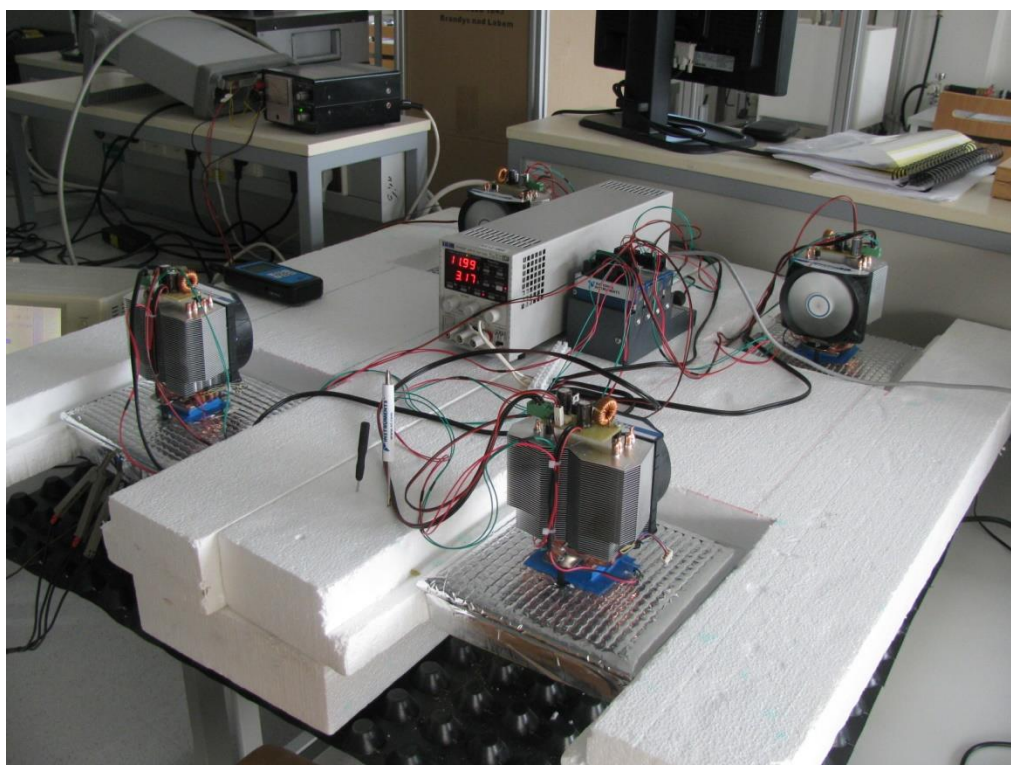


Obrázek E.8 Vyjímatelý čtverec uložený v podpůrné konstrukci





Obrázek E.9 Pohled na měřicí soustavu zepředu



Obrázek E.10 Pohled na měřicí soustavu z boku